

# Trabajo Fin de Grado

Diseño e implementación de un radar de onda  
continua

Design and deployment of a continuous wave  
radar

Autor

Berta Martínez Malo

Director

David Izquierdo Núñez

Ponente

Carlos David Heras Vila

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019



*A mis padres Andrés y Puri,  
a mi hermano Álvaro.*



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar este espacio para dar las gracias a todas aquellas personas que han creído en mí, y me han visto capaz para llegar hasta este punto. En especial a mi familia y amigos, por darme el apoyo necesario para llegar hasta aquí ya sea en los momentos buenos, como en los malos. A mis compañeros de la carrera por pasar este trance a mi lado. A mis guías durante esta etapa de formación, pues sin ellos no hubiera sido quien soy.

En resumen, gracias a todas aquellas personas que han pasado algún momento de su vida conmigo.



# Diseño e implementación de un radar de onda continua

## RESUMEN

Los sistemas radar (*RA*dio *D*etection *And* *R*anging) se utilizan para la detección y localización de objetos a través de señales electromagnéticas. Se puede determinar la distancia a la que se encuentra un objeto por medio del retardo de tiempo de la señal reflejada desde el transmisor hasta el receptor. Además, pueden operar tanto de día como de noche, con cambios adversos en la meteorología.

El principio básico de un radar consiste en la radiación por una antena transmisora de una señal electromagnética. Una parte de la energía transmitida será intercepta por el blanco y se reflejará en varias direcciones. La energía reflejada del blanco que retorna a la antena receptora del radar será captada y procesada para detectar la presencia y posición exacta del objeto.

El proyecto consiste en el desarrollo y análisis de un radar de onda continua con modulación en frecuencia (CW-FM) basado en un modelo para docencia desarrollado previamente en el Laboratorio Lincoln del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Este trabajo fin de grado (TFG) ha sido realizado en el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) en el Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) perteneciente a la Universidad de Zaragoza (UZ).

Para llevar a cabo este proyecto, en primer lugar, se ha tenido que realizar un estudio teórico acerca del comportamiento de los radares y los tipos que existen centrándose en los radares pulsados que sólo pueden detectar la distancia a la que se encuentra el objeto y los radares de onda continua, que a diferencia de los pulsados detectan velocidad y posición.

Después, se ha comprobado el correcto funcionamiento del modelo OpenHardware desarrollado por el MIT, y se han analizado diversas modificaciones para la mejora de este sistema. Entre éstas se puede destacar el diseño y la fabricación de una placa en circuito impreso como la más relevante, reduciendo así el número de placas de las que se componía el sistema inicial, también se han hecho adaptaciones en las alimentaciones empleadas para diseño del sistema radar, pasando del diseño inicial que requería de una fuente de alimentación con doble salida a una única entrada proveniente del USB de un ordenador de control. Además, se ha llevado a cabo la fabricación de unas antenas nuevas adaptándolas a la frecuencia de trabajo escogida. Para finalizar, se ha implementado un programa en Arduino para la elección de la frecuencia de operación.





# Design and deployment of a continuous wave radar

## ABSTRACT

Radar systems (***R**Adio **D**etection **A**nd **R**anging*) are used for detection and location of objects through electromagnetic signals. The distance at which an object is located can be determined by the time delay of the reflected signal from the transmitter to the receiver. In addition, they can operate both day and night, with adverse changes in the weather.

The basic principle of a radar consists on the radiation by an antenna transmitting an electromagnetic signal. A part of the transmitted energy will be intercepted by the target and reflected in several directions. The reflected energy from the target returning to the radar receiving antenna will be captured and processed to detect the presence and exact position of the object.

The project consists on developing and analysing a continuous wave radar with frequency modulation (CW-FM) based on a teaching model previously developed by the Lincoln Laboratory of the MIT (***M**assachusetts **I**nstitute of **T**echnology*). This project has been carried out at the Aragon Institute of Engineering Investigation (I3A) in the Group of Photonic Technologies (GTF) belonging to the University of Zaragoza (UZ).

To begin with, there was a need for a theoretical research on the behaviour of radars and the types that existed. The research was focused on pulsed radars, that could only detect the distance at which the object is located, and continuous wave radars, which, unlike pulsed radars, detect speed and position.

The next stage of the process was to test the OpenHardware model developed by MIT in order to check its correct functioning, followed by a series of modifications to improve the system itself. These included, as the most relevant, the design and manufacture of a printed circuit board, which allowed a shortening in the number of boards that comprised the initial system. Furthermore, adaptations in the feeds used to design the radar system have also been performed, using the USB of a control computer. Within the adaptations, the doubled-output power supply of the initial system was modified into a single input design. In addition, new antennas have been manufactured and adapted to the chosen working frequency. Finally, a program has been implemented in Arduino for the choice of operation frequency.



## Índice General

Índice de Figuras.....	I
Índice de Tablas .....	III
Índice de Acrónimos.....	V
Memoria .....	
Capítulo 1.    Introducción .....	1
1.1.    Radar Pulsado.....	1
1.2.    Radar de Onda Continua .....	2
1.3.    Objetivo.....	3
Capítulo 2.    Antecedentes.....	7
2.1.    Electrónica de Radiofrecuencia.....	7
2.2.    Antenas.....	7
2.3.    Electrónica de Modulación y Detección.....	9
2.4.    Procesado de los datos.....	9
Capítulo 3.    Desarrollo del Radar .....	11
3.1.    Hardware.....	11
3.2.    Software.....	20
3.3.    Pruebas de funcionamiento.....	26
Capítulo 4.    Conclusiones.....	27
4.1.    Líneas futuras .....	27
Capítulo 5.    Bibliografía.....	29
Anexos .....	
Anexo A: Hojas de características .....	33
Anexo B: Esquemáticos .....	43
Anexo C: Dimensión antenas .....	49
Anexo D: Programa de Arduino .....	51
Anexo E: Presupuesto .....	55



## Índice de Figuras

Figura 1. Tren de pulsos.....	2
Figura 2. Configuración de radar monoestática .....	2
Figura 3. Esquema radar modulado en frecuencia con receptor homodino.....	4
Figura 4. a) esquema del Radar. b) Montaje final del curso radar impartido por el MIT.....	7
Figura 5. Antenas fabricadas .....	8
Figura 6. Parámetros $S_{11}$ de las antenas iniciales .....	8
Figura 7. Esquemático inicial del curso del que partimos.....	9
<i>Figura 8. Montaje general de comunicación desde el ordenador hasta las antenas que transmiten y reciben.....</i>	<i>11</i>
Figura 9. Placa de evaluación AD9838 y BUS SPI Click para la generación de la señal con modulación en frecuencia.....	12
Figura 10. Esquemático de la etapa de amplificación .....	13
Figura 11. a) Etapa de amplificación de vídeo. b) Montaje inicial.....	13
Figura 12. Curva filtro de cuarto orden .....	14
Figura 13. Placa PCB desarrollada.....	15
Figura 14. Componentes de RF.....	15
Figura 15. Dimensionado de la antena.....	17
Figura 16. Elección del diámetro de las antenas en función de la frecuencia de trabajo escogida .....	18
Figura 17. Parámetros $S_{11}$ antenas rediseñadas, una cortada a la medida calculada, la otra con más dimensión .....	19
Figura 18. Parámetros $S_{11}$ antenas rediseñadas con la misma dimensión .....	19
Figura 19. Montaje final.....	20
Figura 20. Diagrama de comunicación entre el PC y la PCB a través de la Arduino .....	21
Figura 21. a) Monitor Serie Arduino. b) Demostración de la frecuencia seleccionada .....	23
Figura 22. Modulación triangular con blanco inmóvil .....	24
Figura 23. Modulación triangular con blanco móvil.....	25
Figura 24. a) Demostración montaje final. b) Esquema conjunto .....	26
<i>Figura 25. Huella PCB .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 26. Capa superior PCB.....</i>	<i>46</i>

Figura 27. Capa inferior PCB .....	47
Figura 28. Esquemático.....	48
Figura 29. Diseño de antena con medidas aproximadas.....	50
Figura 30. Interfaz BUS SPI.....	51
Figura 31. Código para la selección de la frecuencia .....	53

## Índice de Tablas

Tabla 1. Bits de control .....	21
Tabla 2. Registro de control .....	21
Tabla 3. Registro de frecuencia .....	22
Tabla 4. Secuencia final de comandos a enviar .....	22
Tabla 5. Consumo de los diferentes dispositivos que forman el proyecto .....	26
Tabla 6. Ceros $X_{nm}$ de la función de Bessel $J_m(x)$ para el modo TE .....	49
Tabla 7. Ceros $X_{nm}$ de la función de Bessel $J_m(x)$ para el modo TM.....	49
Tabla 8. Parámetros para configurar el bus spi .....	51
Tabla 9. Valores del SPI_MODE.....	51
Tabla 10. Presupuesto correspondiente a la etapa de RF .....	55
Tabla 11. Presupuesto necesario para las antenas.....	55
Tabla 12. Presupuesto requerido para el montaje de la placa de circuito impreso .....	56





## Índice de Acrónimos

AMP	(Amplificador)
AO	(Amplificador Operacional)
CW	(Continuous Wave)
CW-FM	(Continuous Wave-Frequency Modulated)
CW-PM	(Continuous Wave-Phase Modulated)
DC	(Continua)
ISM	(Industrial, Scientific and Medical)
LO	(Oscilador Local)
MIT	(Massachusetts Institute of Technology)
MISO	(Master In Slave Out)
MOSI	(Master Out Slave In)
PCB	(Printed Circuit Board)
PRT	(Tiempo de Repetición entre Pulsos)
PW	(Ancho del Pulso)
RF	(Radiofrecuencia)
RT	(Tiempo de Espera)
SPI	(Serial Peripheral Interface)
TFG	(Trabajo Fin de Grado)
VCO	(Oscilador controlado por Tensión)
FFT	(Fast Fourier Transform)



# Memoria



# Capítulo 1. Introducción

---

Los sistemas radar (*Radio Detection And Ranging*) se utilizan para la detección y localización de objetos a través de la señal reflejada por medio del retardo de tiempo desde el transmisor hasta el receptor. Además, pueden operar en cualquier estación del año sin afectarle si es de día o de noche, o si hay cambios adversos en la meteorología.

Los orígenes de los sistemas actuales de radar se remontan a 1886 cuando Heinrich Hertz probó que era posible transmitir ondas de radio y éstas se reflejaban en superficies metálicas. Años después, en 1904, Christian Hülsmeyer patentó un sistema de detección de barcos con una distancia máxima de 1 milla, llamado "Telemobiloskop". Dos décadas después (1922), Guglielmo Marconi expuso el principio de reflexión de las ondas electromagnéticas al incidir sobre un obstáculo, y realizó experimentos de radar en onda continua con una frecuencia máxima de 60 MHz. Durante los años 1925 y 1926, Gregory Breit y Merle Tuve junto con Edward Víctor Appleton, lograron medir la altura de la ionosfera usando técnicas radar. Los mayores avances se realizaron durante la 2ª Guerra Mundial al aumentar el rango de detección de los radares anteriormente comentados adaptando el diseño de radio a señal VHF [1, 2]. Hoy en día, existe una gran variedad de aplicaciones del radar y entre las aplicaciones más habituales se encuentran la vigilancia y el control de tráfico tanto aéreo como terrestre, la navegación marítima y aérea, fines militares, topología y meteorología. [3, 4]

Una de las formas de caracterizar a un radar es según su **forma de onda** donde se pueden distinguir radares de onda pulsada y de onda continua. El radar de onda pulsada transmite de forma periódica un pulso y el resto del tiempo está a la escucha de posibles ecos determinando su posición mediante el retardo temporal. Mientras que en el radar de onda continua (CW) el transmisor emite una señal continua determinando la velocidad del blanco mediante el efecto Doppler. El radar de onda continua se puede modificar añadiendo una modulación de fase o frecuencia (CW-PM, CW-FM) con la finalidad de determinar tanto la velocidad como la distancia a la que está el objetivo.

## 1.1. Radar Pulsado

El funcionamiento del radar pulsado consiste en enviar un tren de pulsos que modulan una portadora sinusoidal para localizar objetos. Con este tipo de radares sólo se obtiene la distancia a la que se encuentra. A continuación, se muestra la figura 1 que representa los parámetros que definen el tren de pulsos. Siendo PW la anchura o duración del pulso, RT el intervalo de espera entre pulsos y PRT el tiempo de repetición entre dos pulsos.

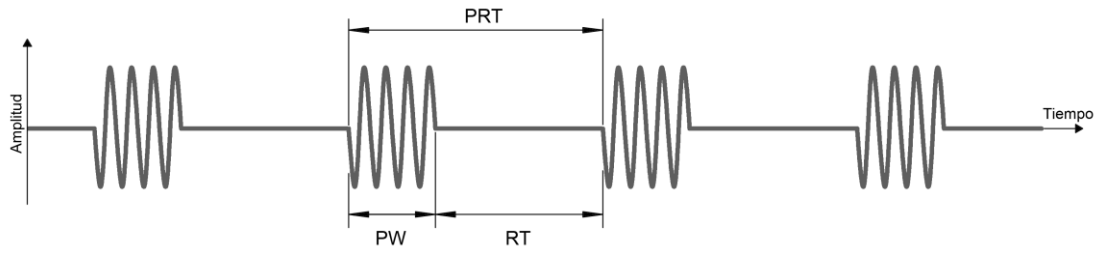


Figura 1. Tren de pulsos

Como la onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz se puede determinar la posición del objeto transmitiendo un pulso y midiendo el tiempo que tarda la señal reflejada en recibirse con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1.1)$$

Donde  $\Delta t$  es el tiempo de retardo o tiempo de vuelo que tarda la señal en ir y volver y  $c$  es la velocidad de la luz o velocidad de propagación de la onda.

## 1.2. Radar de Onda Continua

El radar de onda continua (*Continuous Wave*) transmite una señal continua y su principal aplicación es medir la velocidad de objetos a través del efecto Doppler. Existen tres tipos de radar de onda continua: radar en onda continua no modulado (CW), radar de onda continua con modulación en frecuencia (CW-FM) y radar de onda continua con modulación de fase (CW-PM). Estos dos últimos tipos de radares permiten determinar distancia y velocidad mediante la variación de la fase o la frecuencia.

Las técnicas anteriormente comentadas se basan en el efecto Doppler que consiste en el desplazamiento en frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo entre la fuente y el receptor. En una configuración de radar monoestática como se puede observar en la figura 2, la relación del efecto Doppler viene dada por la siguiente ecuación (1.2) donde  $f_R$  y  $f_0$  son la frecuencia recibida y transmitida respectivamente y  $v_r$  es la velocidad radial a la que se mueve el objeto.

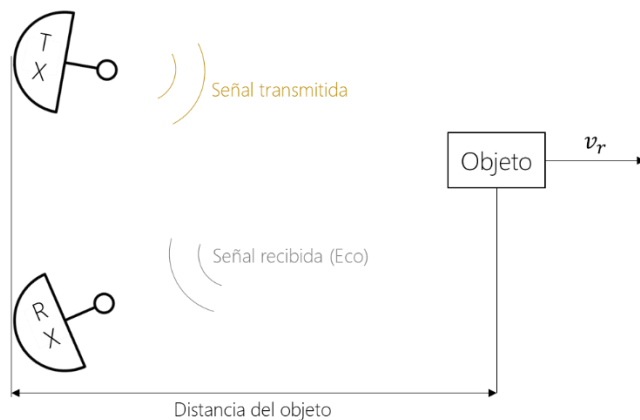


Figura 2. Configuración de radar monoestática

$$f_R = f_0 \cdot \left( \frac{c - v_r}{c + v_r} \right) \quad (1.2)$$

Como se considera que la velocidad del objeto es mucho menor que la velocidad de la luz, la ecuación (1.2) se puede aproximar como:

$$f_R \cong f_0 \cdot \left( 1 - \frac{2v_r}{c} \right) = f_0 - f_0 \frac{2v_r}{c} = f_0 - f_d \quad (1.3)$$

Siendo  $f_d$  la frecuencia Doppler y la que lleva la información de la velocidad radial  $v_r$ .

Las ventajas de los radares de onda continua frente a los radares pulsados son:

- Como el receptor es de banda estrecha son más fáciles de fabricar y por consiguiente más baratos.
- Permite determinar la velocidad del objeto.
- Discrimina blancos fijos frente a móviles. En radares pulsados se necesitan circuitos adicionales.
- No presenta limitaciones de alcance mínimo.

De igual manera, los inconvenientes de los radares de onda continua frente a los radares pulsados son los siguientes:

- Dificultad a la hora de detectar varios objetos a la vez.
- No se detectan blancos fijos.
- Problema de aislamiento ya que el receptor y el transmisor trabajan a la vez, lo que limita la potencia máxima permitida, y por consiguiente el rango máximo.

### 1.3. Objetivo

El objetivo de este proyecto consistirá en el diseño y desarrollo de un radar en onda continua con modulación en frecuencia (CW-FM) basado en un modelo OpenHardware previo desarrollado para docencia por el Laboratorio Lincoln del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) [5]. Para ello, se adaptará la electrónica a la aplicación diseñando una nueva placa de circuito impreso (PCB) en la que se integrarán las etapas de generador de modulación y amplificación de señal. Todo ello se controlará mediante un microcontrolador Arduino para el cual se generará un programa capaz de seleccionar la frecuencia de trabajo y un nuevo software de control y procesamiento en un PC de control.

Este trabajo se centrará en el estudio de un radar de onda continua con portadora RF modulada en frecuencia con modulación triangular. En la figura 3, se puede observar el esquema de este tipo de radar con receptor homodino de doble antena, este esquema es el que se va a utilizar para el desarrollo de este proyecto.

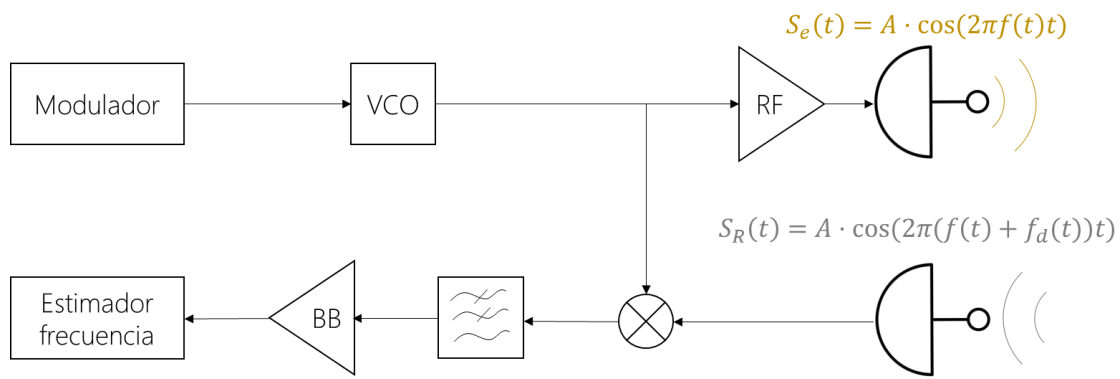


Figura 3. Esquema radar modulado en frecuencia con receptor homodino

De manera conjunta al desarrollo de la placa PCB también se rediseñarán las antenas adaptándolas a las necesidades de frecuencia de operación y tamaño necesario para este proyecto, y se evaluarán distintas antenas directivas para la transmisión y recepción de la señal radar trabajando en la banda de frecuencias específica.

La metodología que se ha aplicado para la realización del proyecto consta de las siguientes tareas:

- Estudio de la teoría de los sistemas de Radar a partir de los apuntes de la asignatura Sistemas de Radiolocalización y Satélites del Máster en Ingeniería de Telecomunicación realizado en la Universidad de Zaragoza y la asignatura Sistemas de Radar impartida en el Centro Universitario de la Defensa.
- Puesta en funcionamiento y comprobación de funcionamiento del proyecto original del Radar.
- Diseño, fabricación y pruebas de las placas de circuito impreso, integrando en la misma placa las etapas de amplificación de video, generador de modulación y amplificación de señal
- Programación del software de control de frecuencia en un microcontrolador Arduino Nano.
- Cálculo, diseño y fabricación de las antenas para operar en la frecuencia de trabajo seleccionada.
- Programación del script de procesamiento de datos con Matlab.
- Pruebas de funcionamiento.

La composición de esta memoria se divide en los siguientes capítulos:

En el **Capítulo 1** se hace una breve introducción a los primeros sistemas de Radar utilizados, centrándose tanto en el radar pulsado como en el radar de onda continua que son los considerados más importantes para el desarrollo de esta memoria.

Seguidamente, en el **Capítulo 2** se expondrán los antecedentes para la realización de este trabajo extrayendo toda la información de la que se ha partido con el montaje original en esta investigación.



El **Capítulo 3** tratará la solución final, qué materiales han sido empleados y cómo se han implementado los distintos scripts de control y procesamiento de la señal, incluyendo las pruebas que se han realizado para valorar el trabajo.

A continuación, en el **Capítulo 4**, se explicarán las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo haciendo énfasis en las mejoras que se han aportado. Para terminar, se expondrán las posibles líneas futuras que pueden surgir de este trabajo.



## Capítulo 2. Antecedentes

Tal y como se ha comentado anteriormente, el objetivo de este trabajo consiste en el montaje de un sistema radar en onda continua con modulación triangular tomando como partida un sistema previo.

La idea de fabricar un radar en onda continua para tareas educativas surgió en el Laboratorio Lincoln del MIT en enero de 2011 y su finalidad fue instruir a los alumnos en el campo del electromagnetismo, las antenas, los circuitos analógicos y el procesamiento de señal. El kit proporcionado por el proyecto original constaba de un radar CW-FM con configuración homodina de doble antena localizado en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) centrado a 2,4 GHz como se puede apreciar en la figura 4.a. La razón principal de porqué se eligió esta frecuencia fue porque este tipo de banda se puede usar sin licencia. El coste del kit ascendió a la cantidad de 360 \$ y para ahorrar costes, las antenas utilizadas fueron latas de metal con las medidas específicas para operar a la frecuencia de trabajo seleccionada. El sistema se montó con seis componentes de radiofrecuencia, circuitos analógicos en una protoboard y se alimentó con ocho pilas de tipo AA. En la figura 4.b se puede observar el montaje final del sistema de radar.

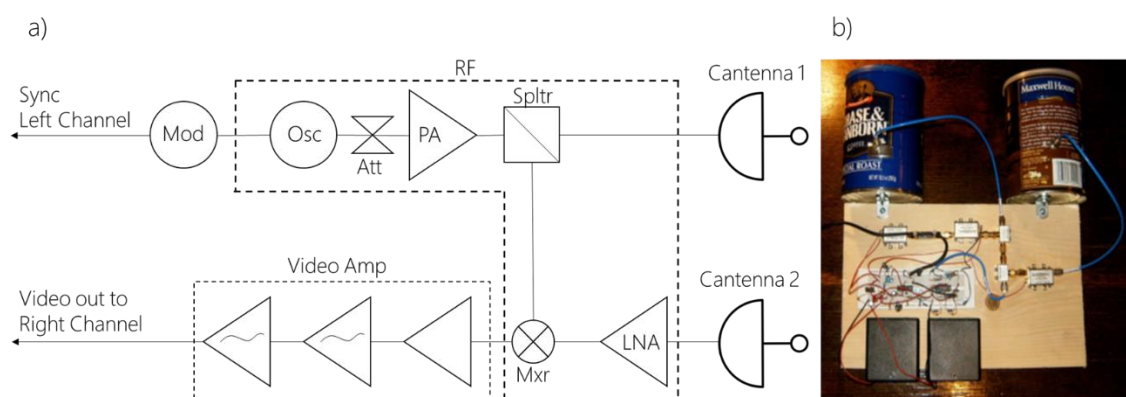


Figura 4. a) esquema del Radar. b) Montaje final del curso radar impartido por el MIT

### 2.1. Electrónica de Radiofrecuencia

La electrónica correspondiente a la etapa de radiofrecuencia (RF) se explicará más adelante en el capítulo del desarrollo del proyecto porque se ha utilizado la misma sin aplicar ninguna variación. Se compone de un oscilador controlado por tensión (VCO), dos amplificadores de potencia, un mezclador, un divisor y un atenuador.

### 2.2. Antenas

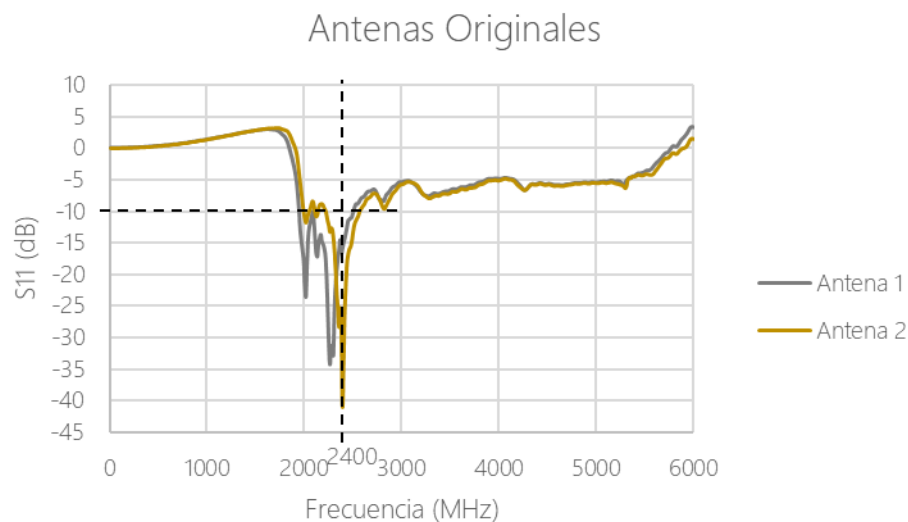
Para el sistema se eligió una configuración de dos antenas como se puede observar en la figura 4, para poder así evitar el acoplamiento mutuo entre transmisión y recepción. Las

antenas eran latas metálicas de un diámetro aproximado de 10 cm que operaban a 2,4 GHz y a esta frecuencia tenían una longitud de onda de guía de 13,5 cm y el alimentador estaba instalado a un cuarto de la longitud de onda de guía. Para su construcción en nuestras primeras pruebas se han elegido latas de conserva mostradas en la figura 5.



*Figura 5. Antenas fabricadas*

En la Figura 6 podemos observar los parámetros  $S_{11}$  medidos de las antenas fabricadas. Para la frecuencia de trabajo deseada (2.4 GHz) el ancho de banda de la antena 1 es de 550 MHz mientras que el ancho de banda de la antena 2 son 340 MHz. Se puede ver en la figura que las antenas no encajan debido a que tienen distintas frecuencias centrales, por lo que se puede llegar a la conclusión de que hay una desadaptación además de que no se están considerando las dimensiones correctas para operar a esa frecuencia debido a las posibles imperfecciones que se pueden encontrar en ellas fruto de su fabricación. Es por ello, que se necesita hacer un rediseño y una nueva fabricación.



*Figura 6. Parámetros  $S_{11}$  de las antenas iniciales*

### 2.3. Electrónica de Modulación y Detección

En la figura 7 se puede observar el esquemático de la electrónica de modulación y amplificación empleado para montar el sistema del radar final. Para dar soporte a todo el sistema se hizo uso de ocho pilas de tipo AA para alimentarlo tanto a 12 V como a 5V.

Para la generación de la señal de modulación, se utiliza un chip XR-2206 del fabricante EXAR que produce una señal de tipo rampa y un pulso de sincronización donde el flanco ascendente coincide con el inicio de la rampa de subida. Esta rampa es la que controla el oscilador controlado por tensión (VCO) [17].

La señal recibida se amplifica con un amplificador de vídeo basado en el amplificador operacional (AO) de bajo ruido MAX414CPD+ del fabricante MAXIM y le sigue un filtro anti-aliasing de cuarto orden con una frecuencia de corte de 15 KHz [18].

La señal amplificada y filtrada se conecta a una entrada de Jack de audio estéreo de un ordenador y con un programa de grabación de audio en formato .wav se adquieren los datos. Para ello, se utiliza el canal derecho, y el canal izquierdo, se utiliza para el pulso de sincronización de la transmisión.

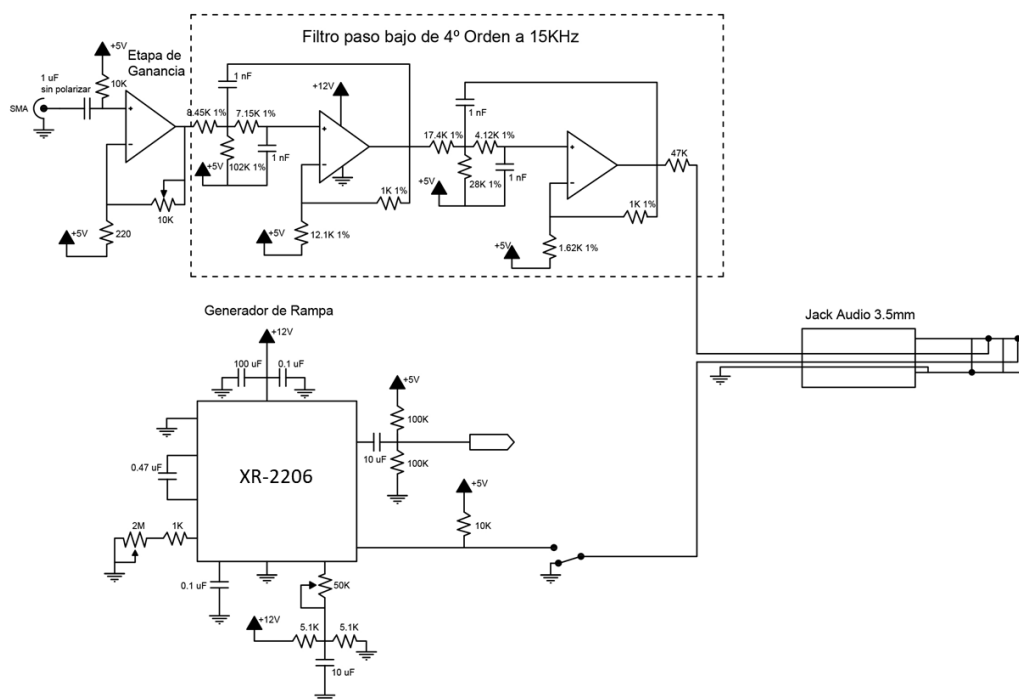


Figura 7. Esquemático inicial del curso del que partimos

## 2.4. Procesado de los datos

La señal recibida se analiza mediante un script de Matlab encargado de generar una gráfica tomando en cuenta los datos procedentes del canal izquierdo (pulsos de sincronización) y el canal derecho (señal recibida), para ello, la señal digitalizada se trocea en

bloques y a cada uno se le aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [5, 6], siendo ésta distinta para el caso de que un objeto sea estático o se encuentre en movimiento.

El curso que imparten en el Instituto de Tecnología hace distinción entre medir la distancia a la que se encuentra el objeto y la velocidad a la que se mueve. Para llevar a cabo este procedimiento sigue dos metodologías distintas. Una en la que la frecuencia de transmisión es constante y la frecuencia de recepción será la suma de la frecuencia de transmisión más la frecuencia producida por el efecto Doppler, esto es, un blanco móvil ( $v_r \neq 0$ ). Al mezclarse la señal de recepción con la señal de transmisión en el receptor homodino, se obtiene una señal digitalizada proporcional a la frecuencia de Doppler cuya expresión se corresponde con  $f_d = f_0 \frac{2v_r}{c}$ .

Para el otro caso en el que el blanco es estático ( $v_r = 0$ ), la frecuencia de transmisión tendrá una variación con el tiempo en forma de diente de sierra, pero la frecuencia de recepción será una función que dependerá de la frecuencia de transmisión en función de un retardo conocido como el tiempo de vuelo. Por lo que señal obtenida a la salida del mezclador será una función que dependerá del tiempo que tarda la señal en llegar al objeto y volver a la antena emisora  $f_{Rx} = f_{Tx}(t - \Delta t)$ .

Se hace distinción de si el objeto está fijo en cuyo caso se determinará la posición a la que se encuentra el objeto, o si el objeto tiene movimiento, lo que permitirá determinar la velocidad con la que viaja el objeto. Como mejora que se plantea en este proyecto, se propone realizar el estudio para medir tanto distancia como velocidad a la vez.

# Capítulo 3. Desarrollo del Radar

El Radar desarrollado se puede dividir en distintas partes que a continuación en este capítulo se detallan. Un apartado de hardware en el que se describirán las etapas que componen el radar, una sección de software en el que se explicarán los códigos que han sido creados para el procesamiento de las señales y un punto final que estará compuesto por las pruebas que se han realizado para comprobar el correcto funcionamiento del sistema radar.

## 3.1. Hardware

En la parte Hardware se analizarán las distintas partes que forman el sistema radar. La figura 8 que se muestra a continuación, refleja el sistema final. Para llevar a cabo el montaje es necesario un ordenador con puerto USB para alimentar la placa de circuito impreso (PCB) y el Arduino encargado de establecer la comunicación con el chip y generar la señal de tipo triangular en función de la frecuencia de trabajo que el usuario especifique por el puerto serie del Arduino. Después la salida de la PCB se introduce al oscilador controlado por tensión (VCO), a través de la señal Vtune y recorre toda la etapa de radiofrecuencia (RF). La señal que se genera a la salida del mezclador se conecta a una etapa de amplificación de señal, pasando por una etapa de ganancia, y un filtro paso bajo de cuarto orden con frecuencia de corte de 15 KHz para prevenir el aliasing. Para finalizar, la salida del conjunto de las etapas nombradas se manda al ordenador de control nuevamente a través de la entrada de audio, que, junto con un programa de grabación de sonido, almacena la información que se haya recopilado de las antenas y se procesa con Matlab para su posterior estudio.

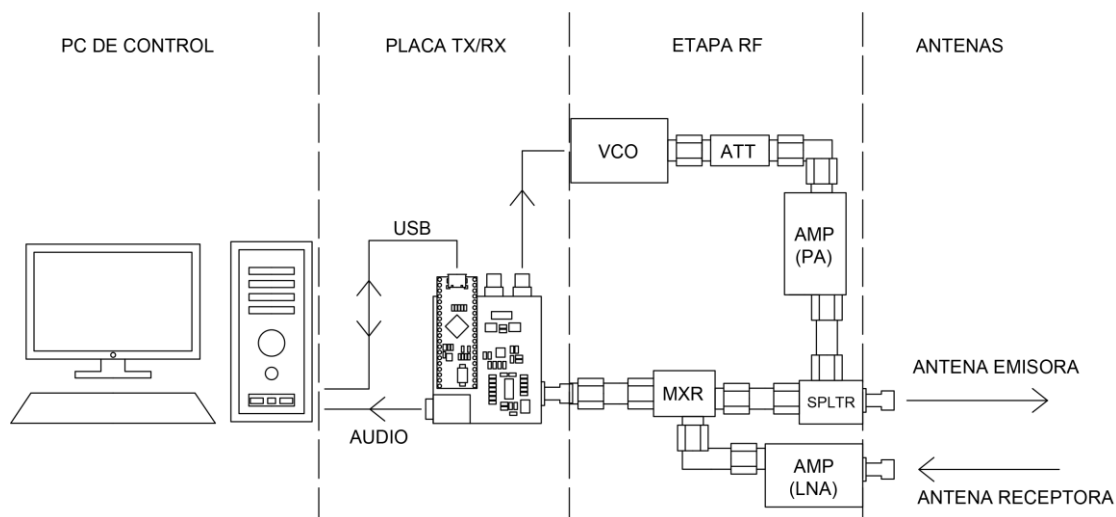


Figura 8. Montaje general de comunicación desde el ordenador hasta las antenas que transmiten y reciben

Primero se explica el transmisor que genera la señal de tipo triangular con frecuencia modulada y las distintas versiones que se probaron. Después se describe la etapa de amplificación de recepción y para finalizar se desarrolla la etapa de RF. Además de los puntos

comentados anteriormente, se analiza el método empleado para la selección y fabricación de las antenas escogidas.

### 3.1.1. Diseño de la placa de transmisor / receptor

La primera etapa del Radar anterior es un modulador que genera una señal de tipo rampa con frecuencia modulada. Para ello hacen uso de un chip XR-2206 del fabricante EXAR Corp. Se ha optado como primera versión hacer uso del AD9838 de Analog Devices y un conversor de USB a SPI MCP2210 de Microchip para su configuración, ambos montados sobre placas de evaluación como los que se aprecian en la figura 9 [13-16].

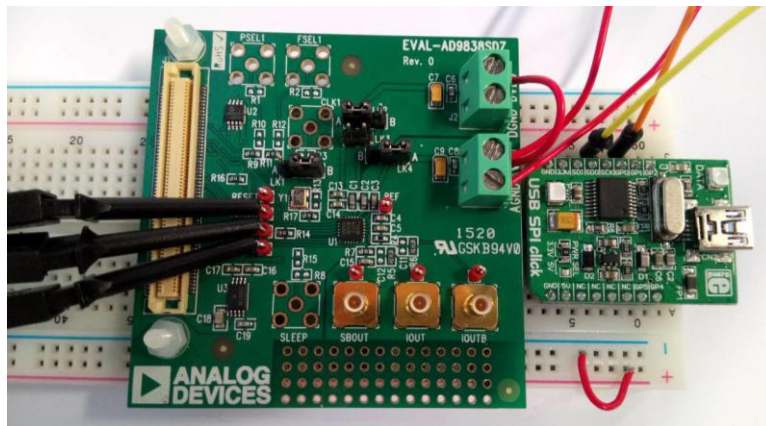


Figura 9. Placa de evaluación AD9838 y BUS SPI Click para la generación de la señal con modulación en frecuencia

Una vez verificado el correcto funcionamiento, se procede al desarrollo del sistema que se ha diseñado para el tratamiento de la señal proveniente de la etapa anterior como se puede apreciar en la figura 10. La señal de referencia que se genera en el chip AD9838 pertenece al pulso de sincronización de la señal de transmisión cuya información se enviará al canal izquierdo de la salida de audio. Para que la señal de control del VCO sea regulable, se ha diseñado una etapa compuesta por tres amplificadores operacionales encargados de ajustar el valor de amplitud de la señal triangular generada por el chip anterior y su nivel de continua. La señal de salida fruto de la combinación de las dos anteriores será la señal moduladora que se enviará al VCO.



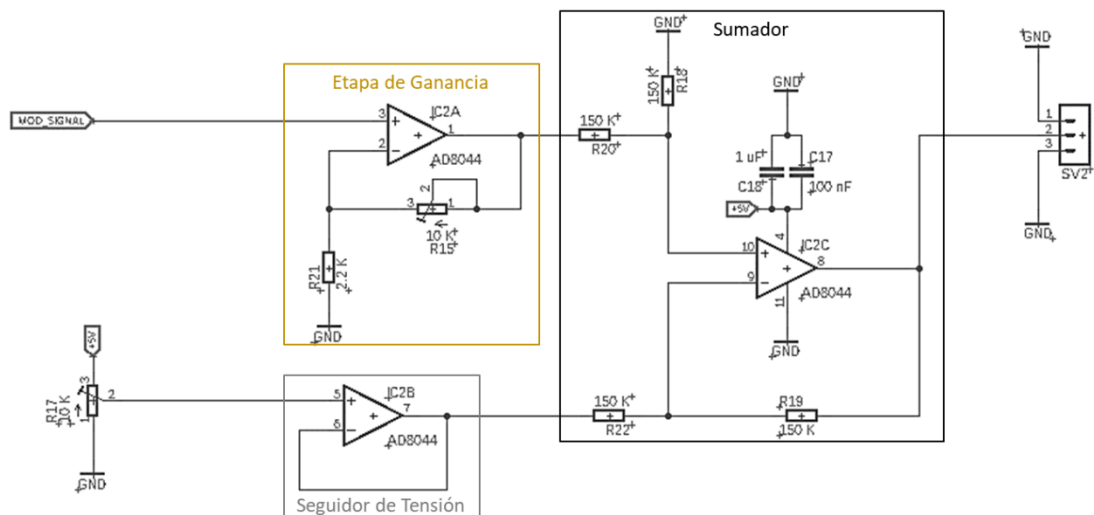


Figura 10. Esquemático de la etapa de amplificación

La etapa de amplificación y filtrado de la recepción parte del esquemático que se muestra en la figura 11.a. Esta etapa se compone de un amplificador operacional cuádruple de bajo ruido que proporciona una ganancia regulable por un potenciómetro seguido de un filtro de cuarto orden que previene el aliasing y que tiene una frecuencia de corte de 15 KHz. Este filtro es activo con una configuración de tipo Sallen-Key, y se compone de dos etapas en cascada de segundo orden. En la figura 11.b se puede observar el montaje de una placa de prototipado para comprobar el funcionamiento de esta etapa, realizar las pruebas preliminares y que sirviera como punto de partida para realizar las pruebas del amplificador de vídeo, con el objetivo final de desarrollar el circuito impreso.

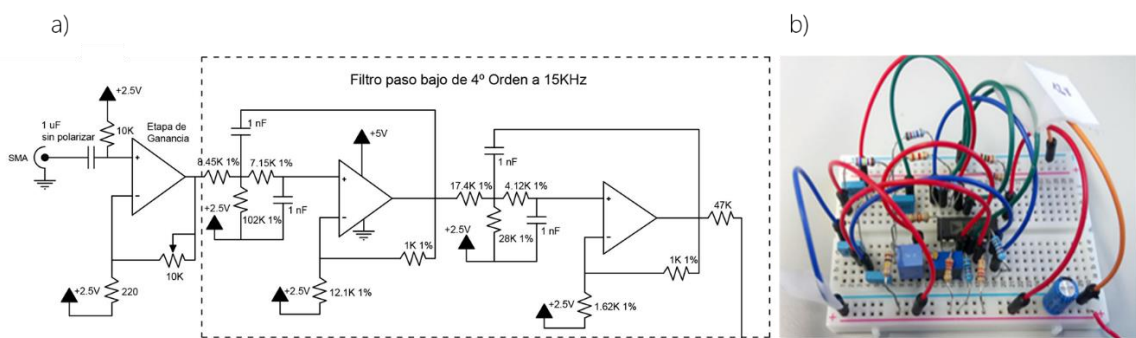
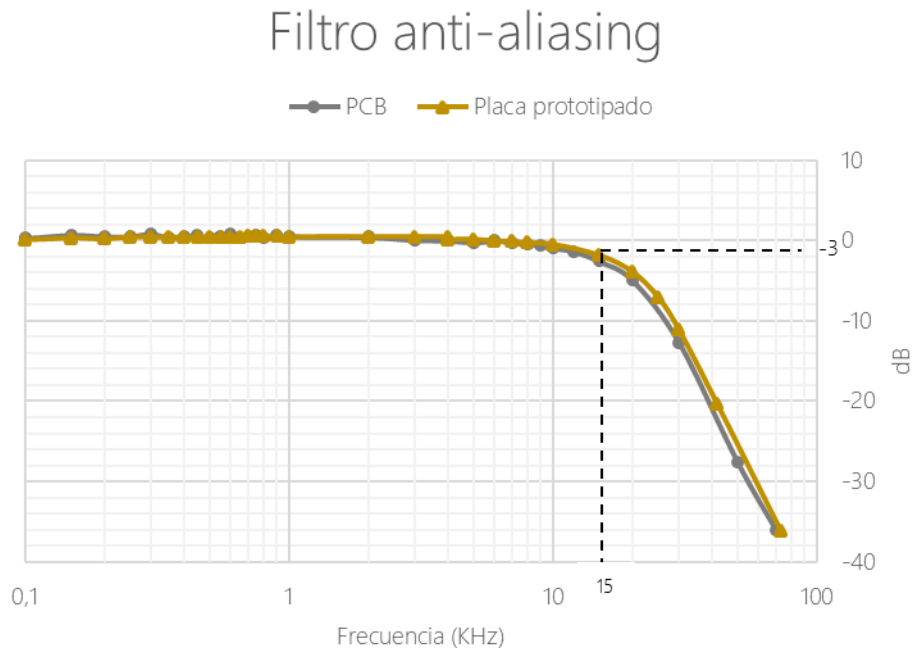


Figura 11. a) Etapa de amplificación de vídeo. b) Montaje inicial.

La salida de esta etapa se conectará a un puerto de entrada estéreo de un ordenador siendo éste el canal derecho o señal de recepción. Como se ha de digitalizar la señal, hay que cumplir el teorema de Nyquist, el cual expone que la frecuencia de muestreo ha de ser al menos dos veces el ancho de banda de la señal. Si la frecuencia de muestreo es menor, la señal digitalizada contendrá componentes frecuenciales falsas o aliasing, de ahí la necesidad de utilizar un filtro anti-aliasing. En la figura 12 podemos apreciar el correcto funcionamiento tanto de la placa de prototipado como de la placa PCB diseñada. El filtro es paso bajo de cuarto orden de tipo Butterworth con respuesta plana en la banda de paso, con frecuencia de corte de 15 KHz. La pendiente de estos filtros es de 80 dB/década o de 24 dB/octava. Para

realizar esta grabación, la razón de muestreo empleada es de 30 KHz, de ahí que la frecuencia de Nyquist sean 15 KHz.



*Figura 12. Curva filtro de cuarto orden*

El montaje final de la placa de circuito impreso se muestra en la figura 13, en ella, el Arduino configura el generador de señal triangular (2), y éste enviará la señal al amplificador modulador (3), cuyos dos potenciómetros uno modifica la señal de continua y el otro el nivel de la ganancia de tal forma que si se giran en el sentido de las agujas del reloj se disminuye el valor. La salida de esta etapa irá conectada al Vtune del oscilador controlado por tensión. La señal recibida en la etapa de RF se conectará al amplificador de vídeo (1) mediante un conector SMA que, además, posee un potenciómetro para modificar la ganancia de tal forma que si se gira en el sentido de las agujas del reloj disminuye el valor de la ganancia. Para finalizar, la salida de esta etapa se conectará con un conector estéreo de Jack para la grabación de los datos con la tarjeta de sonido de un PC donde el canal derecho será la señal recibida y amplificada, y el canal izquierdo se utilizará para el pulso de sincronización de la transmisión.

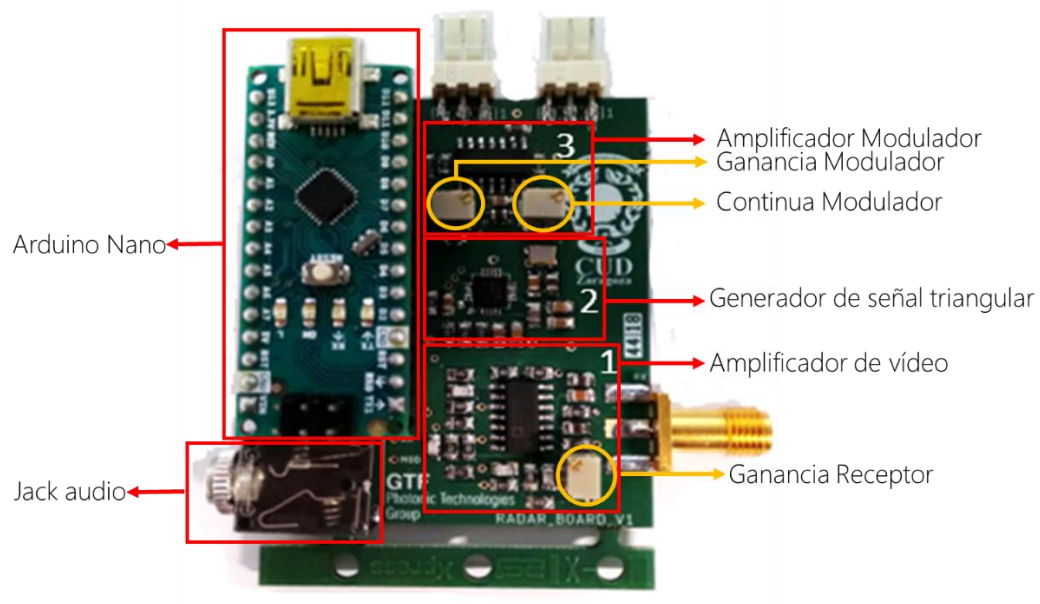


Figura 13. Placa PCB desarrollada

### 3.1.2. Etapa de RF

En la figura 14 se muestra la etapa de RF que tiene el sistema, se caracteriza por ser un sistema homodino de doble antena para evitar interferencias entre la señal transmitida y la recibida. Ésta se compone de un VCO (Oscilador Controlado por Voltaje), un amplificador, un mezclador, un divisor / combinador y un atenuador. Todos los elementos que se han seleccionado para esta etapa poseen una alimentación de 5 V, se han escogido con estas características ya que se ha adaptado toda la electrónica para que funcione a ese voltaje. Todos estos elementos y sus características se pueden encontrar en el Anexo A.

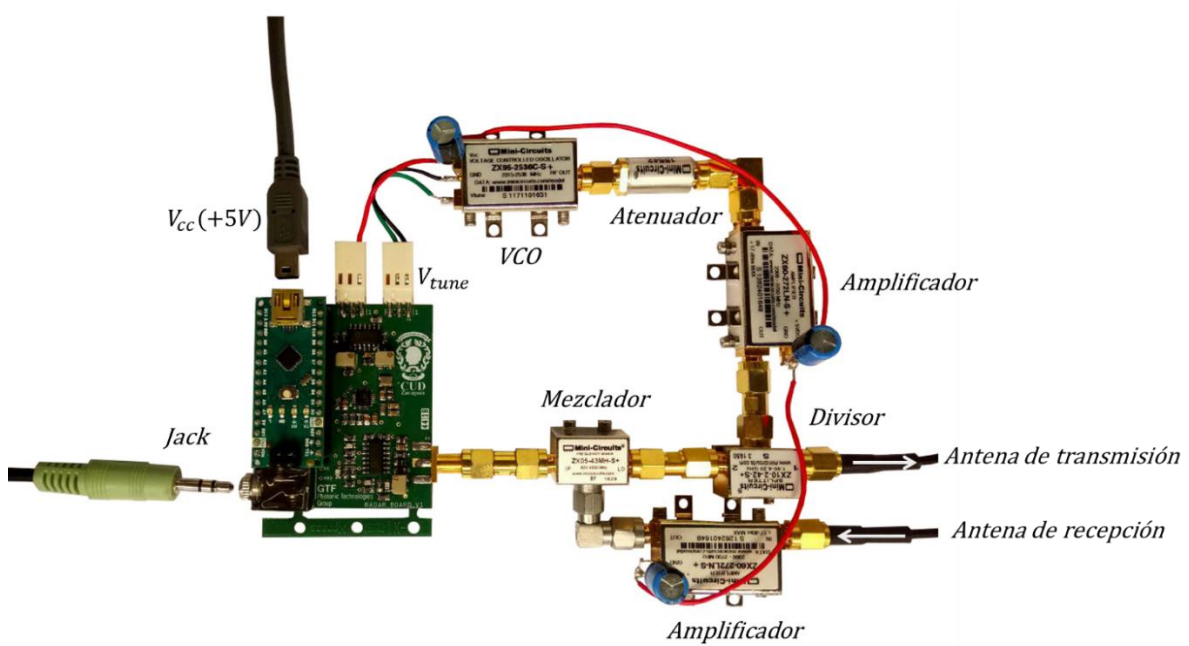


Figura 14. Componentes de RF

El primer elemento es un **oscilador controlado por tensión** (VCO), es un generador de señal sinusoidal cuya frecuencia se fija por tensión. Para este dispositivo se ha escogido el ZX95-2536C+ del fabricante Mini-Circuits [19], ya que posee un rango de frecuencia comprendido entre 2,3 y 2,5 GHz y para este trabajo se ha elegido como frecuencia fundamental 2,4 GHz, además posee una potencia de salida nominal de 6 dBm, se alimenta con una tensión de 5 V y tiene una tensión  $V_{tune}$  regulable.

A la salida del VCO se sitúa un **atenuador** para reducir la potencia de la señal, con la finalidad de acondicionar dicha señal para la etapa posterior. La funcionalidad de los atenuadores puede ser tanto para proteger una etapa de un circuito con un nivel de señal muy alto, como para proporcionar una adaptación de impedancia precisa. Este dispositivo es el VAT-3+ del fabricante Mini-Circuits [20] y a la salida atenúa 3 dB respecto a la entrada.

El siguiente dispositivo es un **amplificador** de bajo ruido LNA (*Low-Noise Amplifier*) que amplifica una señal sin degradar excesivamente su relación señal a ruido. En este caso, se ha hecho uso del dispositivo ZX60-272LN-S+, también del fabricante Mini-Circuits [21]. Este dispositivo se utiliza como amplificador de transmisión antes de conectarse con el divisor y después se utiliza como amplificador de recepción antes de conectarse con el mezclador. Las características más importantes por las que se ha escogido este dispositivo son el rango de frecuencias al que opera entre 2,3 GHz y 2,7 GHz, y posee una ganancia entre los 11.5 dB y 14 dB.

A la salida del amplificador se sitúa un **divisor**, dispositivo pasivo que divide una señal de entrada en dos señales de salida con características específicas de fase y amplitud. En este caso se ha hecho uso del dispositivo ZX10-2-42-S+ del fabricante Mini-Circuits [22] cuyo rango de frecuencias varía entre 1.9 GHz y 4.2 GHz

El siguiente dispositivo es el **mezclador**, es un dispositivo con tres puertos (RF (entrada), LO (oscilador local), IF (salida)) que genera una frecuencia de salida, menor que las dos frecuencias de entrada, cuando éstas se mezclan en su interior. Este elemento utilizado es el ZX05-43MH-S+ del fabricante Mini-Circuits [23] ya que su frecuencia de operación es similar a la que poseen el resto de los componentes.

### 3.1.3. Antenas

Para nuestro sistema se hace uso de una guía de onda cilíndrica con sección circular con un elemento activo o monopolo a una distancia determinada como se puede ver en la figura 15. Este tipo de antenas comúnmente recibe el nombre de “Cantenas” y suelen ser latas metálicas con las dimensiones específicas que sean necesarias para operar en la frecuencia de trabajo deseada.

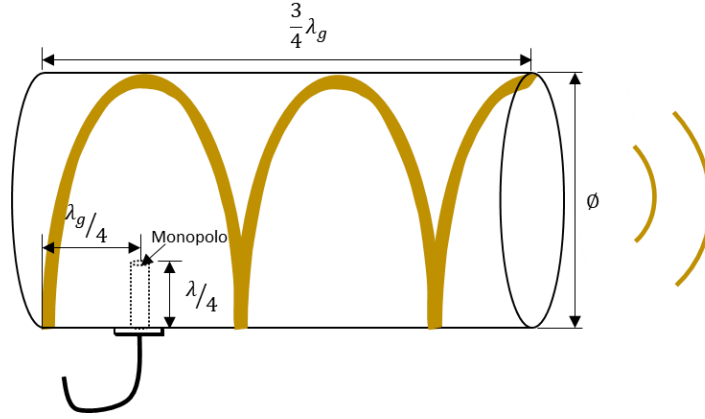


Figura 15. Dimensionado de la antena

Para que la transmisión y la recepción de la señal sea óptima, el elemento activo, o monopolo, se ha de colocar a una distancia de  $\lambda_g/4$  o múltiplo de este factor (siendo  $\lambda_g$  la longitud de onda dentro de la guía). En ese punto la onda estacionaria que se forma dentro de la cavidad tiene un máximo, de este modo, se consigue que en el fondo de la antena se forme un nulo, y toda la señal se radia. Las fórmulas que se van a desarrollar y utilizar a continuación se explican con más detalle en el Anexo C y en la referencia [7].

La longitud de onda de corte depende del diámetro de la guía cilíndrica de radio  $a$  según la siguiente ecuación:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{\chi'_{mn}} \quad (3.1)$$

Al tratarse del modo  $TE_{11}$ ,  $\chi'_{mn}$  se corresponde con las funciones de Bessel  $J_m(\chi'_{mn}) = 1,8412$ . Por lo tanto, sustituyendo los valores de (3.1) se obtiene la siguiente aproximación para el cálculo de la longitud de onda de corte (3.2):

$$\lambda_c = 1,706 \cdot D \quad (3.2)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la antena.

Por otro lado, la longitud de onda en la guía  $\lambda_g$ ,  $\left(\beta_{nm} = \frac{2\pi}{\lambda_g}\right)$  verifica que:

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_g}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 \quad (3.3)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío.

Finalmente, si despejamos  $\lambda_g$  de la ecuación (3.3), se obtendrá el valor de la longitud de la onda en la guía como:

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (3.4)$$

Teniendo en cuenta que en este caso la frecuencia de trabajo escogida es de 2,4 GHz, en la figura 16 se muestran las medidas de las antenas en función del diámetro y de las

frecuencias de corte tanto para el modo  $TE_{11}$  como el  $TM_{01}$ . Para este caso hay que tener en cuenta que la frecuencia de trabajo tiene que ser menor que la frecuencia del modo  $TM_{01}$ , pero ha de ser mayor al modo  $TE_{11}$ . En ella se puede observar que el diámetro ideal para el correcto funcionamiento de las antenas debería de estar en el rango que oscila de 75 a 95 mm. Para nuestro sistema se han construido dos antenas con un diámetro aproximado de 84 mm una longitud de la antena de 195 mm, distancia a la que colocar el monopolo 64 mm y tamaño del monopolo de 31,2 mm.

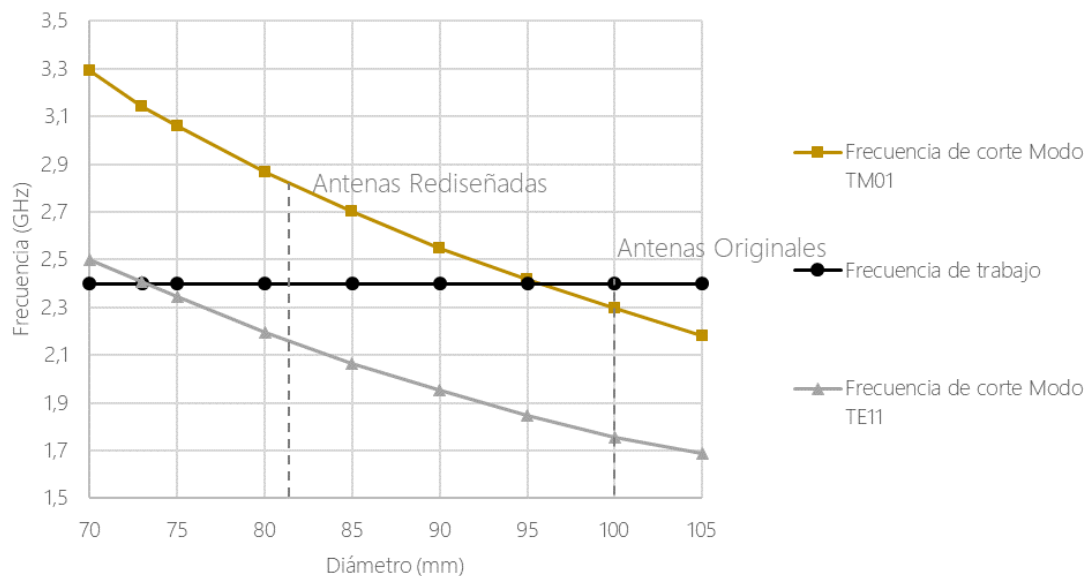


Figura 16. Elección del diámetro de las antenas en función de la frecuencia de trabajo escogida

Como se ha comentado anteriormente, el diámetro de las antenas iniciales es de 100 mm, por lo tanto, como se puede apreciar en la gráfica la frecuencia de trabajo es mayor que la frecuencia del modo  $TM_{01}$ , por lo que es una configuración multimodal y no se consigue una adaptación óptima.

Una vez fabricadas las dos antenas, se ha realizado un análisis de los parámetros S para ver su funcionamiento. En la figura 17, se pueden observar los parámetros  $S_{11}$  de las antenas, haciendo distinción de que una de ellas ha sido cortada en función de los cálculos realizados para el óptimo funcionamiento y la otra se ha probado sin realizar ningún ajuste. Podemos comprobar que la antena que ha sido redimensionada con las medidas tiene un mejor comportamiento que la original.

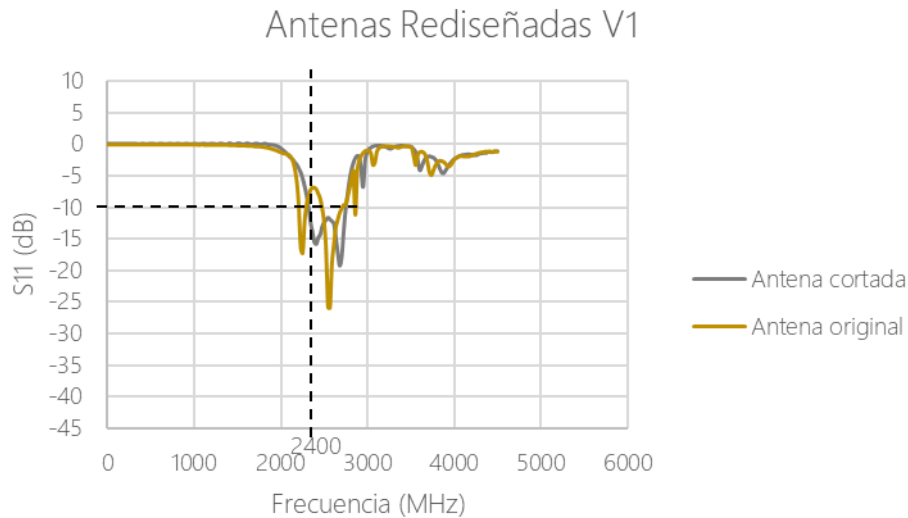


Figura 17. Parámetros  $S_{11}$  antenas rediseñadas, una cortada a la medida calculada, la otra con más dimensión

El ancho de banda correspondiente a la antena original cuya longitud era de 25 cm es de 220 MHz, mientras que el ancho de banda de la antena fabricada es de 450 MHz. Se puede comprobar que la antena que no ha sido fabricada en función de los cálculos que se explican en este apartado tiene un ancho de banda menor y está desplazada respecto a la frecuencia de corte a la que se ha diseñado este proyecto. La frecuencia de corte inferior y superior de la lata cortada son 2,34 y 2,75 GHz respectivamente.

Sin embargo, en la figura 18 se comprueba que, si se corta la segunda antena a la dimensión a la que se ha cortado la primera en función de las dimensiones que se explican anteriormente, el ancho de banda de las antenas es el mismo (450 MHz). Se concluye que las antenas con las dimensiones calculadas están bien adaptadas a la frecuencia de trabajo que se ha escogido.

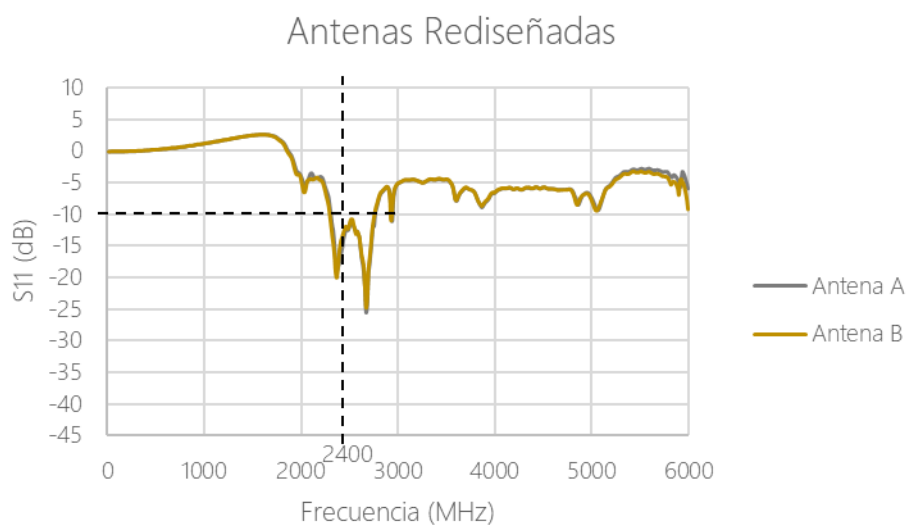


Figura 18. Parámetros  $S_{11}$  antenas rediseñadas con la misma dimensión

#### 3.1.4. Montaje final

El resultado final del montaje queda como se muestra en la figura 19. En él se puede ver el esquema que se ha comentado al principio de este capítulo. Desde un PC nos comunicamos con un Arduino que generará la señal con la frecuencia especificada y con el mismo puerto USB alimentará la placa de circuito impreso. La señal generada por el modulador se conectará a la etapa de RF. En el divisor se conectará la antena de transmisión y en el amplificador la antena de recepción. La señal generada se enviará a la PCB por un puerto SMA y una vez que haya sido amplificada por el amplificador de vídeo, volverá al ordenador a través del puerto estéreo Jack donde con Matlab se leerá el archivo .wav y se procesarán los datos.

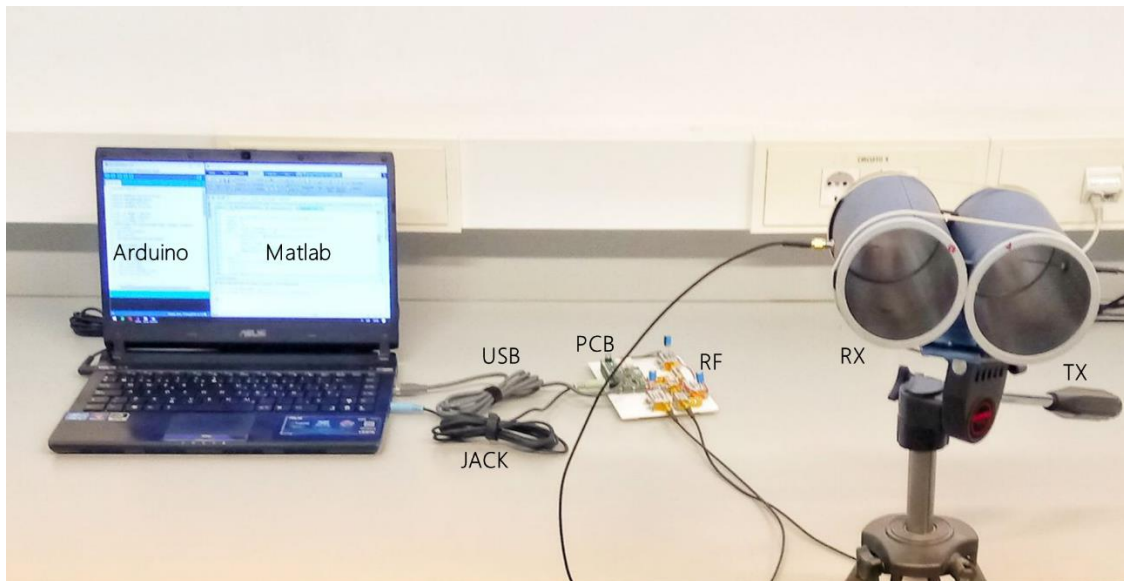


Figura 19. Montaje final

### 3.2. Software

En el apartado de Software se explicarán las distintas metodologías empleadas para la comunicación entre el sistema de radar y el ordenador. Primero se describirá el software de control que ha sido necesario para la comunicación que se ha de realizar entre la placa diseñada y el ordenador para establecer la frecuencia de operación que el usuario desee, además, se explicará un ejemplo de comandos a mandar para una frecuencia concreta. Después, se analizarán los scripts de captura y procesado que se han empleado para el desarrollo e implementación del sistema radar.

#### 3.2.1. Software de control

En la figura 19 se puede apreciar el diagrama de comunicación que hay entre los distintos componentes. Un ordenador alimenta y envía los datos de la frecuencia elegida al microcontrolador del Arduino a través del puerto USB, y éste transmite esta información al generador de modulación mediante el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*).



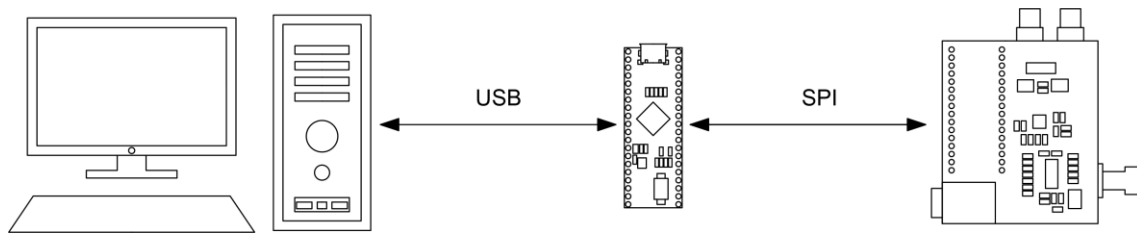


Figura 20. Diagrama de comunicación entre el PC y la PCB a través de la Arduino

El programa de Arduino realiza la traducción de comandos entre el PC y el generador y se puede simplificar en los siguientes pasos. El usuario manda por el puerto serie del Arduino la frecuencia en Hertzios a la que quiere que opere la señal triangular. Primero se mandará una secuencia de reset, después se establecerá el comando que especifica en qué registro de frecuencia se va a mandar la palabra, y para finalizar, se mandará la frecuencia que el usuario introdujo por consola. El Arduino realiza un proceso de conversión a hexadecimal de ese valor aplicando la fórmula que se comenta posteriormente.

Para hacer el envío de comandos del Arduino al chip, se ha seguido el planteamiento propuesto en la hoja de características del chip AD9838 [11]. Este chip contiene un registro de control de 16 bits como se puede observar en la tabla 1 donde los bits comprendidos entre D15-D8 hacen referencia a los bits más significativos (MSB) y los bits comprendidos entre D7-D0 son los bits menos significativos (LSB).

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	B28	HLB	FSEL	PSEL	PIN/SW	RESET	SLEEP1	SLEEP12	OPBITEN	SIGN/PIB	DIV2	0	MODE	0

Tabla 1. Bits de control

Si los bits D15-D14 están a 0 como se puede observar en la tabla 2, se notificará al chip de que se va a modificar el contenido del registro de control.

D15	D14	D13-D0
0	0	Bits de Control

Tabla 2. Registro de control

Para generar una señal de tipo triangular a la frecuencia que se ha comentado previamente, lo primero que se ha de mandar al chip es una sentencia de RESET para reestablecer la comunicación e iniciar un nuevo ciclo de operación, es decir, poner el bit D8 a 1. Ésta sentencia se corresponde con el siguiente comando:

$$\text{RESET: } \underbrace{0000.0001}_{\text{MSB}} \underbrace{0000.0000}_{\text{LSB}} \xRightarrow{\text{Hex}} 0x0100$$

Después se ha de establecer el modo de funcionamiento triangular, para ello hay que activar el bit correspondiente al modo, en este caso D1. Si el bit D13 está a 1, permitirá que una palabra se cargue en el registro de frecuencia mediante dos escrituras, primero la de los 14 bits menos significativos, y después la segunda escritura correspondiente con los 14 bits más significativos. Se manda el siguiente comando:

$$\text{CMD: } \underbrace{0010.0000}_{\text{MSB}} \underbrace{0000.0010}_{\text{LSB}} \xRightarrow{\text{Hex}} 0x2002$$

Para la comprensión de cómo se ha de operar con la placa Arduino se va a realizar un ejemplo para una frecuencia específica de 10 KHz y una frecuencia de reloj de 16 MHz (MCLK).

Se obtiene el valor de la frecuencia de registro de salida como una combinación de la frecuencia específica y la del reloj. Este valor obtenido se convierte tanto a hexadecimal como a binario y se envía al chip AD9838 en dos escrituras diferentes. En una escritura, los 14 bits menos significativos y en la otra los 14 bits más significativos [12]. Para este ejemplo en concreto quedaría de la siguiente manera:

$$FreqReg0 = \frac{f_{out}}{f_{MCLK}} \times 2^{28} = \frac{10 \text{ KHz}}{16 \text{ MHz}} \times 2^{28} = 167772 \xrightarrow{\text{Hexadecimal}} 0028F5C$$

$$\xrightarrow{\text{Binario}} \underbrace{0000.0000.0010.10}_{MSB} \underbrace{00.1111.0101.1100}_{LSB}$$

En este caso como se ha cogido el registro de frecuencia 0 como se puede observar en la tabla 3, los bits 15 y 14 estarán a 0 y 1 respectivamente.

D15	D14	D13-D0
0	1	FREQ0
1	0	FREQ1

Tabla 3. Registro de frecuencia

Para finalizar se mandará el registro de frecuencia en dos escrituras distintas de 14 bits cada una. Primero se enviará el registro correspondiente a los 14 bits menos significativos. La secuencia correspondiente a la palabra 0100 1111 0101 1100. Finalmente se envía el registro correspondiente a los 14 bits más significativos, que se corresponde con la palabra 0100 0000 0000 1010.

$$\text{FREQ0: } \underbrace{01}_{@} \underbrace{00.1111.0101.1100}_{LSB} \xrightarrow{\text{Hex}} 4F5C \text{ \& } \underbrace{01}_{@} \underbrace{00.0000.0000.1010}_{MSB} \xrightarrow{\text{Hexadecimal}} 0x400A$$

Como resumen, en la tabla 4 se muestran las palabras que se han mandado a la placa Arduino y en el orden que se han tenido que enviar.

Hexadecimal	Binario
0x0100	0000 1000 0000 0000
0x2002	0010 0000 0000 0010
0x4F5C	0100 1111 0101 1100
0x400A	0100 0000 0000 1010

Tabla 4. Secuencia final de comandos a enviar

En la figura 21.a se puede ver la captura de los comandos que se están mandando a través del Arduino para la selección de la frecuencia. La figura 21.b representa los pulsos que se han de mandar para cada una de las palabras enviadas. FSYNC actúa como activador de los datos, es decir, cuando esta señal esté en nivel bajo los datos podrán ser transferidos al chip. Una vez que FSYNC está en nivel bajo los datos se transmitirán en el flanco de bajada de la señal de reloj (SCLK), que contiene 16 pulsos.

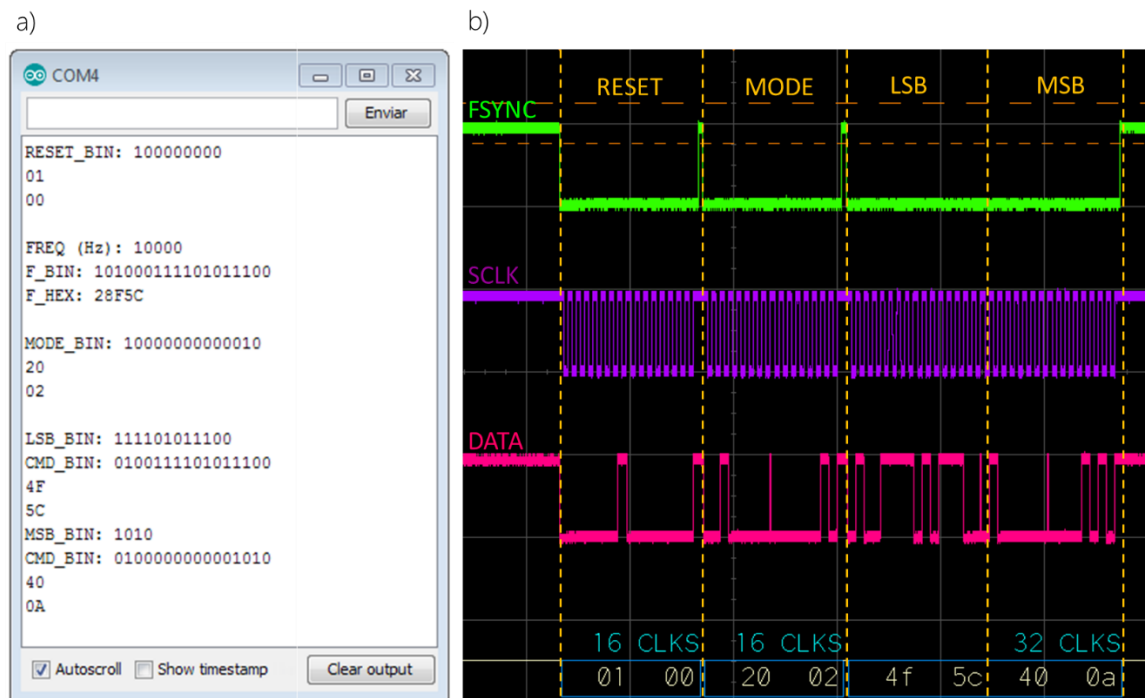


Figura 21. a) Monitor Serie Arduino. b) Demostración de la frecuencia seleccionada

### 3.2.2. Script de procesamiento

En este apartado se van a comentar los scripts que han programado para procesar la información del radar. Para llevar a cabo la digitalización de los datos analógicos, la salida de la etapa de amplificación, correspondiente al canal derecho, se ha conectado con un puerto de entrada de audio estéreo al ordenador y se ha grabado durante un período de tiempo establecido por el usuario la información que posteriormente se ha analizado. Para ello, tanto los canales de audio derecho e izquierdo se han grabado en un archivo de audio con extensión .wav.

Después de haber grabado las dos señales, se procede al análisis, para ello, en primer lugar, se leen las señales mediante un script de Matlab y aplicando las ecuaciones del radar se representa la distancia y la velocidad a la que se encuentra el objeto.

Como la señal que se ha digitalizado es difícil de analizar en el dominio del tiempo, se realiza la Transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform*) para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. A través de las componentes frecuenciales, se podrá detectar la distancia y velocidad de los objetos de forma simultánea.

A la salida del mezclador se obtiene la diferencia entre la frecuencia de la antena transmisora y la antena receptora. A esta frecuencia se le denomina frecuencia de batido y permite obtener la distancia a la que se encuentra el objeto.

Para el caso en el que el blanco es inmóvil ( $v_r = 0$ ) como se muestra en la figura 22.a, la frecuencia de transmisión y la frecuencia de recepción son iguales con la diferencia de que la frecuencia de recepción adquiere un retardo de tiempo  $\Delta t$  conocido como tiempo de vuelo.

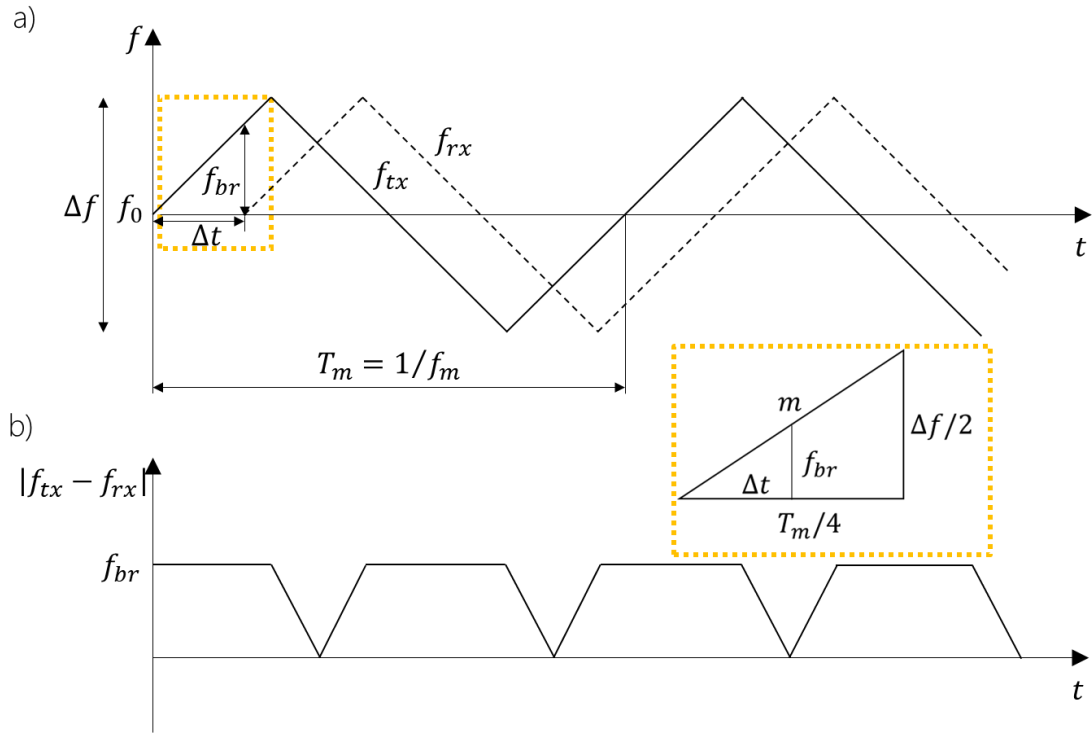


Figura 22. Modulación triangular con blanco inmóvil

Considerando el triángulo rectángulo que se obtiene al hacer zoom sobre la figura anterior, la ecuación de la frecuencia de batido se puede expresar como:

$$f_{br} = m \cdot \Delta t \quad \Delta f/2 = m \cdot T_m/4 \quad (3.7)$$

Donde  $m$  hace referencia a la pendiente de la recta y  $\Delta t$  es el tiempo de retardo, si sustituimos los valores de  $m$  y  $\Delta t$  en Ec. (3.7), obtenemos la fórmula de la frecuencia de batido.

$$f_{br} = \frac{2\Delta f}{T_m} \cdot \frac{2R}{c} \xrightarrow{\text{despejando } R} R = \frac{c \cdot f_{br}}{4\Delta f} \cdot T_m = \frac{c}{4\Delta f \cdot f_m} \cdot f_{br} \quad (3.8)$$

La señal a la salida de mezclador será la que se produzca al restar la frecuencia de transmisión con la frecuencia de recepción. Este valor se denomina frecuencia de batido y se puede observar en la figura 22.b.

Para realizar este proceso, la señal digitalizada en tiempo se inventana en periodos y se le aplica a cada bloque la Transformada de Fourier, de esta forma pasamos al dominio de la frecuencia y se detectará la distancia a la que se encuentra el objeto a través de los máximos que se han formado al realizar esta conversión.

Por el contrario, si el objeto tiene una velocidad indeterminada ( $v_r \neq 0$ ) como se puede observar en la figura 23.a, la señal de eco recibida presentará un desplazamiento debido al efecto Doppler ( $f_d$ ), de esta forma habrá que detectar si el objeto se acerca o se aleja, esta frecuencia es directamente proporcional a la velocidad con la que viaja el objeto.

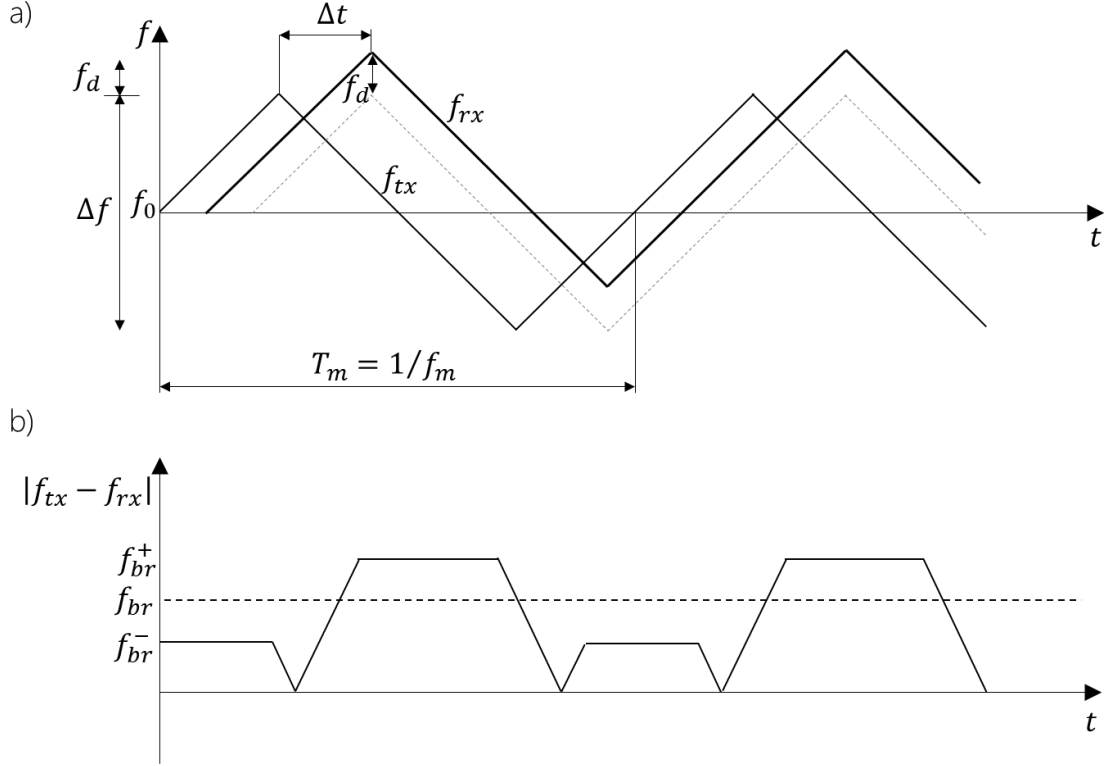


Figura 23. Modulación triangular con blanco móvil

Por lo tanto, para calcular la distancia y la velocidad a la que viaja el objeto será necesario conocer  $f_b^+$  y  $f_b^-$ .

$$\begin{cases} f_b^+ = f_{br} + f_d \\ f_b^- = f_{br} - f_d \end{cases} \quad (3.9)$$

Siendo  $f_d = -f_0 \frac{2v_r}{c}$  y  $f_{br} = \frac{2\Delta f}{T_m} \cdot \frac{2R}{c}$ , si se sustituyen los valores, la ecuación de la distancia al objeto se podrá expresar como:

$$f_{br} = \frac{f_b^+ + f_b^-}{2} \Rightarrow R = \frac{c}{4\Delta f \cdot f_m} \cdot \frac{f_b^+ + f_b^-}{2} = \frac{c}{4\Delta f} \cdot \frac{f_{br}}{f_m} \quad (3.10)$$

Y la velocidad del objeto se calculará como:

$$f_d = \frac{f_b^+ - f_b^-}{2} \Rightarrow v_r = -\frac{c}{2f_0} \cdot \left( \frac{f_b^+ - f_b^-}{2} \right) = -\frac{c}{2} \cdot \frac{f_d}{f_0} \quad (3.11)$$

En este caso, la señal producida a la salida de mezclador denominada como frecuencia de batido vendrá determinada por la frecuencia Doppler como se puede observar en la figura 23.b.

De igual manera que en el caso anterior, la señal digitalizada en el dominio del tiempo se divide en bloques a los que se le aplica la Transformada de Fourier y mediante los picos que se forman seremos capaces de obtener la distancia a la que se encuentra el objeto como función de la frecuencia de batido.

### 3.3. Pruebas de funcionamiento

Para comprobar el correcto funcionamiento de este proyecto, lo primero que se debió tener en cuenta fue el consumo que poseían las distintas etapas que lo forman. En la tabla 5 quedan reflejados estos valores. Se puede observar, que el consumo medido en el montaje final es mayor, debido a que la placa Arduino se encarga de alimentar el circuito además de que los dispositivos con los que se ha diseñado la placa de circuito impreso son diferentes con los que se ha realizado la placa de prototipado.

Protoboard		PCB	
Componentes	Consumo (mA)	Componentes	Consumo (mA)
RF	120	RF	110
AD9838 (5V)	20	PCB	80
Amp Modulador	40	Arduino	40
Amp Vídeo	15		
<b>TOTAL</b>	<b>195</b>	<b>TOTAL</b>	<b>230</b>

Tabla 5. Consumo de los diferentes dispositivos que forman el proyecto

Una vez que se ha verificado que con el USB de la placa Arduino se puede alimentar todo el circuito, se ha procedido a comprobar las señales al pasar por las distintas etapas. En la figura 24.a queda reflejado de la siguiente forma, la señal de entrada (IN) se corresponde con la señal triangular que se ha generado mediante el programa de Arduino a la frecuencia que el usuario haya especificado. Las señales RX y MOD hacen referencia al canal derecho e izquierdo que se utilizan para la señal de vídeo del amplificador operacional y el pulso de sincronización respectivamente. La señal de salida VTUNE será la que se conecta al VCO. En la figura 24.b, se puede observar el recorrido que realiza la señal desde que se genera la señal triangular, hasta que se manda la señal de recepción al ordenador.

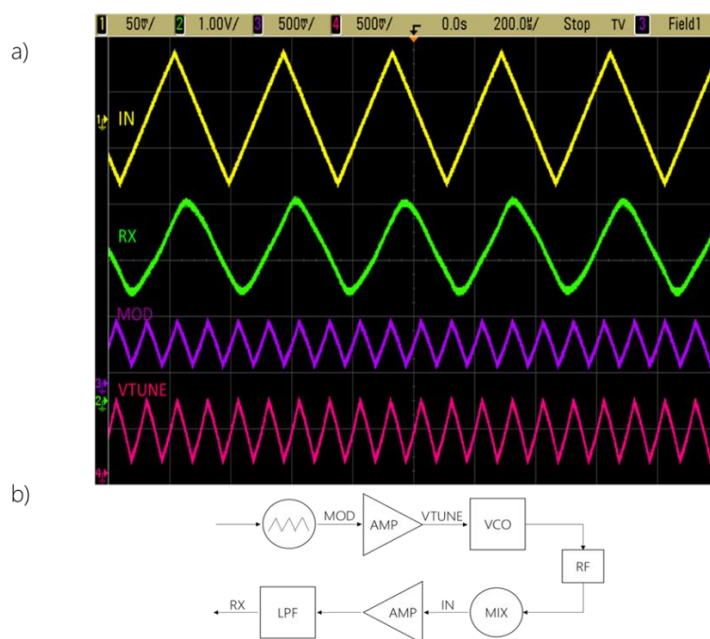


Figura 24. a) Demostración montaje final. b) Esquema conjunto

## Capítulo 4. Conclusiones

---

El objetivo de este proyecto ha sido el desarrollo y el análisis de un radar en onda continua con modulación triangular. Para llevarlo a cabo, se ha realizado un rediseño tanto en la parte hardware como en software en relación con el conjunto original logrando una optimización tanto del software como del hardware.

En la parte hardware, la etapa de alimentación ha pasado del diseño inicial que requería de una fuente de alimentación externa con salidas de 12 V y 5 V a una única entrada de 5 V que más adelante reduce a 2,5 V mediante un regulador DC-DC para la alimentación del amplificador de vídeo. Esta mejora elimina la dependencia de alimentación externa y permite aumentar la versatilidad del equipo ya que cualquier dispositivo con una salida tipo USB es capaz de alimentar el conjunto diseñado.

Se ha reducido el número de placas de las que se componía el proyecto. Originalmente constaba de varias placas encargadas de cada uno de los procesos. El resultado final de este trabajo es la integración de todas estas dentro de una misma placa PCB encargada de la amplificación de vídeo, generación de rampas, y etapa de amplificación que introduce un nivel de señal continua y una ganancia permitiendo aumentar o reducir la amplitud de la señal.

La elección de unas nuevas antenas en este proyecto venía dada por la necesidad de contar con unos componentes seleccionados según los cálculos realizados para la frecuencia de trabajo escogida para el desarrollo de esta memoria. Para ello se debió tener en cuenta la tipología de las antenas, sus propiedades materiales y su dimensionado.

En la parte software, se ha implementado un programa mediante un chip Arduino con el fin de agilizar la selección de la frecuencia. Ya que pasamos de un sistema que requería del envío de comandos teniendo que modificar el lenguaje de comunicación a un sistema con todos los comandos preestablecidos anteriormente y que cada vez que se carga en la placa permite seleccionar únicamente la frecuencia a la cual se desee trabajar.

### 4.1. Líneas futuras

Se ha adaptado la electrónica a la aplicación mejorando el diseño inicial integrándolo en una placa de circuito impreso y desarrollando un nuevo software de control. Una vez se ha adaptado la electrónica, el siguiente objetivo ha sido el análisis de su comportamiento y la validación de éste.

Además, existe una línea futura de investigación en este apartado si se mejora la etapa de amplificación diseñada.

Otra línea de investigación futura consiste en el diseño de los elementos de la etapa de RF para que, en vez de ser elementos discretos, sean integrables en la propia PCB ya diseñada en este proyecto.

Aunque anteriormente no se ha contemplado otro tipo de antenas para realizar este trabajo, otro enfoque de investigación podría ser la fabricación o el rediseño de otro tipo de antenas, como pueden ser las antenas Vivaldi. Así como, evaluar otras bandas de frecuencia como por ejemplo 5 GHz lo que supondría entre otras cosas que el tamaño de las antenas se reduzca.

En este trabajo se ha llevado a cabo procesado de la información mediante programas computacionales, por lo tanto, cualquier mejora de la implementación realizada puede ser una línea futura. Relacionado con los programas computacionales existe otra línea futura que consistiría en fusionar el control de procesado en un único programa, ya que ahora, la selección de la frecuencia se está haciendo con Arduino, mientras que el procesado de los datos y posterior análisis se ha llevado a cabo con Matlab.



# Capítulo 5. Bibliografía

---

- [1] David Izquierdo Núñez. *Sistemas de Radiolocalización y Satélites*. Centro Universitario de la Defensa
- [2] Óscar Penny Cabrera. *Historia y Teoría del Radar. Capítulo I*
- [3] Santiago Cruz José Adrián. *Radar detector de objetos*. Ciudad de México 2016
- [4] Merrill I. Skolnik. *Introduction to Radar Systems*. Edición internacional 1981. ISBN 0-07-057909-1
- [5] Gregory L. Charvat, Alan J. Fenn, Bradley T. Perry. *The MIT IAP Radar Course: Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture (SAR) Imaging*. MIT
- [6] Gregory L. Charvat. MIT IAP 2011 Laptop Based Radar: *Block Diagram, Schematics, Bill of Material, and Fabrication Instructions*. Laboratorio Lincoln MIT
- [7] Constantine A. Balanis. *Advanced engineering electromagnetics*. 2ª Edición
- [8] <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>
- [9] <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/bus-spi/>
- [10] <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>
- [11] Analog Devices: *11 mW Power, 2.3 V to 5.5 V, Complete DDS*. (<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9838.pdf>)
- [12] Analog Devices: Application Note (AN-1070): *Programming the AD9833/AD9834*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1070.pdf>
- [13] Analog Devices. Evaluation Board User Guide (UG-268): *Evaluating the AD9838 11 mW Power, 2.3 V to 5.5 V, 16 MHz Complete DDS*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-268.pdf>
- [14] Microchip: *MCP2210 USB-to-SPI Protocol Converter with GPIO (Master Mode)*. (<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22288A.pdf>)
- [15] Microchip: *MCP2210 Breakout Module User's Guide*. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/52056A.pdf>
- [16] MikroElektronika: *USB SPI click*. (<https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/usb-spi/usb-spi-click-manual-v100.pdf>)
- [17] Sparkfun: *XR-2206 Monolithic Function Generator*. [https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206\\_104\\_020808.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf)
- [18] Digi-Key: *Single/Dual/Quad, 28MHz, Low-Noise, Low-Voltage, Precision Op Amps MAX414CPD+*. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX410-MAX414.pdf>

[19] Mini-Circuits: ZX95-2536C+ VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR.  
<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX95-2536C+.pdf>

[20] Mini-Circuits: VAT-3+ SMA Fixed Attenuator. <https://www.minicircuits.com/pdfs/VAT-3+.pdf>

[21] Mini-Circuits: ZX60-272LN-S+ Low Noise Amplifier.  
<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-272LN+.pdf>

[22] Mini-Circuits: ZX10-2-42-S+ Power Splitter/Combiner.  
<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX10-2-42-S+.pdf>

[23] Mini-Circuits: ZX05-43MH-S+ Frequency Mixer wide band.  
<https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX05-43MH-S+.pdf>

# Anexos



## Anexo A: Hojas de características

A continuación, se muestran las hojas de características de los elementos que se han empleado para la etapa de RF.

- Oscilador Controlado por Tensión (VCO): ZX95-2536C+, Mini-Circuits
- Atenuador (ATT): VAT-3+, Mini-Circuits
- Amplificador de Bajo Ruido (LNA): ZX60-272LN+, Mini-Circuits
- Divisor (Splitter): ZX10-2-42-S+, Mini-Circuits
- Mezclador (Mixer): ZX05-43MH-S+, Mini-Circuits



Coaxial

# Voltage Controlled Oscillator

ZX95-2536C+

5V Tuning for PLL IC's 2315 to 2536 MHz

## Features

- low phase noise
- low pulling
- low pushing
- protected by US patent 6,790,049

## Applications

- r & d
- lab
- instrumentation
- industrial scientific and medical
- WiMAX
- TD-SCDMA / HSDPA



CASE STYLE: GB956

Connectors	Model
SMA	ZX95-2536C-S+

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

## Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQ. (MHz)		POWER OUTPUT (dBm)	PHASE NOISE dBc/Hz SSB at offset frequencies,kHz  Typ.				TUNING					NON HARMONIC SPURIOUS (dBc)	HARMONICS (dBc)		PULLING pk-pk @12 dB (MHz)	PUSHING (MHz/V)	DC OPERATING POWER	
								VOLTAGE RANGE (V)	SENSI- TIVITY (MHz/V)	PORT CAP (pF)	3 dB MODULATION BANDWIDTH (MHz)	Vcc (volts)						Current (mA)	
	Min.	Max.		Typ.	1	10	100	1000	Min.	Max.	Typ.	Typ.		Typ.	Typ.			Max.	Typ.
ZX95-2536C+	2315	2536	+6	-75	-105	-128	-148	0.5	5	57-77	13.6	70	-90	-18	-10	2.5	2.5	5	45

## Maximum Ratings

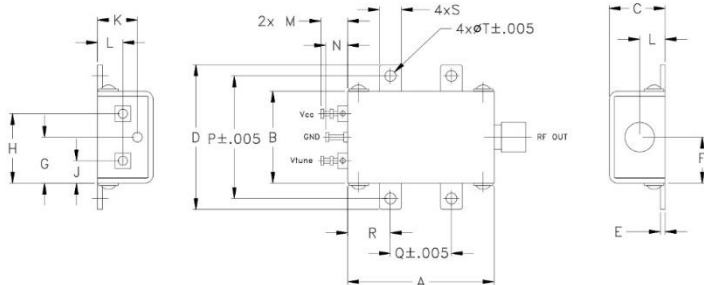
Operating Temperature	-55°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Absolute Max. Supply Voltage (Vcc)	5.6V
Absolute Max. Tuning Voltage (Vtune)	7.0V
All specifications	50 ohm system

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



NOTE: When soldering the DC connections, caution must be used to avoid overheating the DC terminals. See Application Note AN-40-10.

## Outline Drawing



## Outline Dimensions (Inch mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	wt.
1.20	.75	.46	1.18	.04	.38	.38	.57	.18	.33	.21	.22	.18	1.00	.50	.35	.18	.106	grams
30.48	19.05	11.68	29.97	1.02	9.65	9.65	14.48	4.57	8.38	5.33	5.59	4.57	25.40	12.70	8.89	4.57	2.69	35.0

### Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

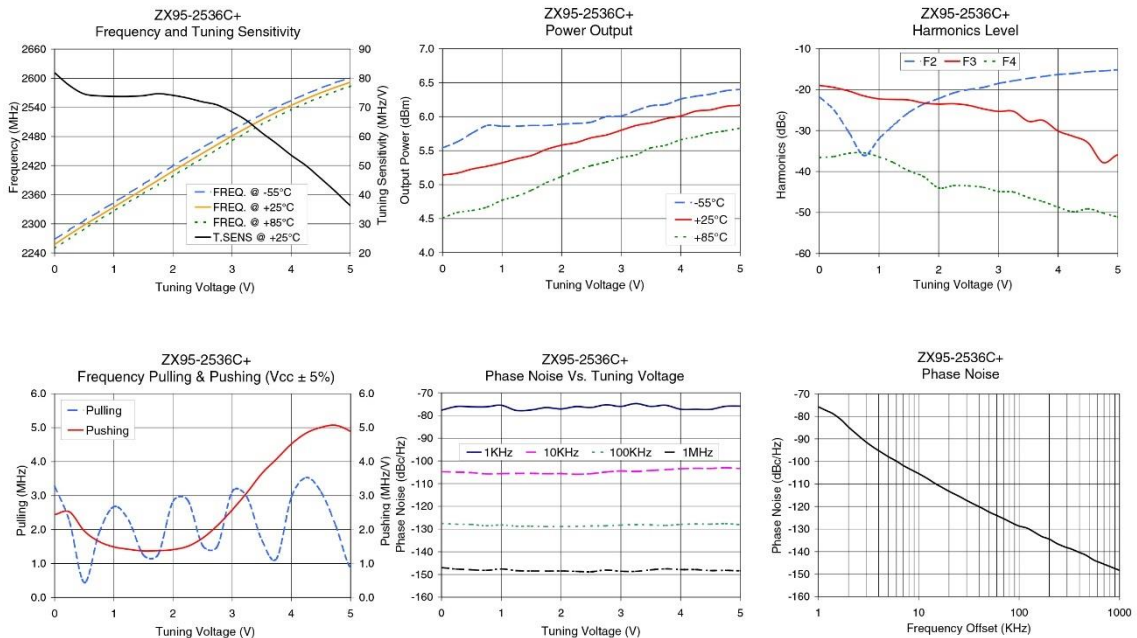
REV. A  
M152328  
EDR-6804F2  
ZX95-2536C+  
RAV  
150923  
Page 1 of 2

# Performance Data & Curves\*

# ZX95-2536C+

V TUNE	TUNE SENS (MHz/V)	FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)			I <sub>cc</sub> (mA)	HARMONICS (dBc)			FREQ. PUSH (MHz/V)	FREQ. PULL (MHz)	PHASE NOISE (dBc/Hz) at offsets				FREQ OFFSET (KHz)	PHASE NOISE at 2432 MHz (dBc/Hz)
		-55°C	+25°C	+85°C	-55°C	+25°C	+85°C		F2	F3	F4			1kHz	10kHz	100kHz	1MHz		
0.00	81.90	2267.6	2257.4	2249.2	5.54	5.14	4.51	36.63	-21.7	-19.0	-36.6	2.44	3.28	-77.7	-104.8	-127.5	-147.0	1.0	-75.73
0.50	74.61	2306.7	2297.3	2289.5	5.76	5.23	4.62	37.11	-30.5	-20.4	-35.5	1.96	0.44	-76.2	-105.1	-128.0	-147.9	2.0	-84.74
0.75	73.96	2325.2	2315.9	2308.2	5.87	5.27	4.67	37.29	-36.1	-21.6	-35.4	1.65	1.90	-76.2	-105.7	-128.6	-148.2	3.5	-93.54
1.00	73.76	2344.0	2334.4	2326.4	5.86	5.32	4.77	37.45	-32.0	-22.3	-36.4	1.49	2.67	-75.5	-105.6	-128.2	-147.6	6.0	-99.82
1.25	73.75	2362.7	2352.9	2344.6	5.86	5.38	4.83	37.57	-28.6	-22.4	-37.9	1.42	2.27	-77.8	-105.5	-128.7	-148.3	8.5	-103.77
1.50	74.01	2381.6	2371.3	2362.6	5.87	5.43	4.92	37.67	-25.6	-22.5	-39.9	1.37	1.25	-77.6	-105.5	-128.7	-148.4	10.0	-105.41
1.75	74.71	2400.7	2389.8	2380.6	5.87	5.52	5.03	37.73	-23.5	-23.3	-41.2	1.38	1.27	-76.5	-105.6	-128.9	-148.5	20.8	-113.60
2.00	74.15	2419.7	2408.5	2398.9	5.89	5.58	5.12	37.80	-22.2	-23.5	-44.0	1.41	2.83	-77.1	-105.6	-128.9	-148.4	35.5	-118.96
2.25	73.21	2438.5	2427.0	2417.2	5.90	5.62	5.21	37.87	-20.8	-23.5	-43.4	1.51	2.86	-76.1	-105.9	-128.8	-148.6	60.7	-124.10
2.50	71.91	2456.9	2445.3	2435.4	5.92	5.69	5.28	37.92	-20.0	-23.9	-43.5	1.75	1.53	-76.5	-105.6	-128.7	-148.8	85.2	-127.31
2.75	70.82	2475.0	2463.3	2453.3	6.00	5.73	5.33	37.95	-19.5	-24.7	-43.9	2.12	1.51	-75.3	-104.9	-128.6	-148.1	100.0	-128.68
3.00	68.45	2492.6	2481.0	2471.1	6.01	5.80	5.40	37.97	-18.5	-25.3	-44.9	2.58	3.12	-76.0	-104.4	-128.3	-148.6	142.9	-131.46
3.25	65.44	2509.4	2498.1	2488.3	6.09	5.87	5.44	37.99	-17.9	-25.3	-45.0	3.09	2.95	-74.7	-104.6	-128.1	-148.7	167.8	-133.29
3.50	61.36	2525.2	2514.5	2504.9	6.16	5.91	5.54	38.02	-17.3	-27.7	-46.3	3.65	1.69	-76.0	-104.2	-128.2	-148.0	200.6	-134.52
3.75	57.60	2540.3	2529.8	2520.7	6.18	5.97	5.58	38.06	-16.8	-27.5	-47.3	4.08	1.15	-75.5	-103.9	-128.4	-147.5	281.6	-137.84
4.00	53.56	2554.4	2544.2	2535.4	6.26	6.01	5.66	38.06	-16.3	-30.1	-48.7	4.52	2.96	-77.2	-103.4	-128.0	-147.9	330.7	-138.85
4.25	50.01	2567.6	2557.6	2549.0	6.30	6.08	5.70	38.06	-16.1	-31.4	-49.8	4.84	3.53	-77.3	-103.2	-127.7	-147.8	464.2	-141.63
4.50	45.62	2579.9	2570.1	2561.7	6.33	6.10	5.76	38.05	-15.6	-33.0	-49.1	5.01	3.11	-77.3	-103.3	-127.8	-148.3	554.9	-143.78
4.75	41.10	2591.0	2581.5	2573.3	6.38	6.15	5.79	38.05	-15.5	-37.8	-50.1	5.07	2.11	-76.0	-103.0	-127.6	-148.2	914.6	-147.64
5.00	36.26	2601.0	2591.8	2583.8	6.40	6.17	5.83	38.06	-15.2	-35.9	-51.1	4.89	0.87	-75.8	-103.4	-128.1	-148.4	1000.0	-148.33

\*at 25°C unless mentioned otherwise



## Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 [sales@minicircuits.com](mailto:sales@minicircuits.com)



# Coaxial SMA Fixed Attenuator

50Ω 1W 3dB DC to 6000 MHz

VAT-3+



CASE STYLE: FF704

Connectors Model  
SMA VAT-3+

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

## Maximum Ratings

Operating Temperature -45°C to 100°C  
Storage Temperature -55°C to 100°C

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

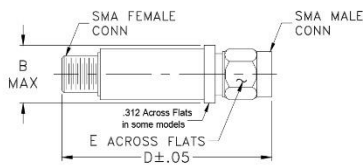
## Features

- wideband coverage, DC to 6000 MHz
- 1 watt rating
- rugged unibody construction
- off-the-shelf availability
- very low cost

## Applications

- impedance matching
- signal level adjustment

## Outline Drawing



## Outline Dimensions (inch mm)

B	D	E	wt
.410	1.43	.312	grams
10.41	36.32	7.92	10.0

## Electrical Specifications

FREQ. RANGE (MHz)	ATTENUATION * (dB)					VSWR (:1)			MAX. INPUT POWER (W)
	DC-3 GHz		3-5 GHz	5-6 GHz	DC-6 GHz	DC-3 GHz	3-5 GHz	5-6 GHz	
f <sub>1</sub> -f <sub>2</sub>	Nom.	Typ.	Typ.	Typ.	Typ.	Typ.	Max.	Typ.	Max.
DC-6000	3±0.3	0.20	0.15	0.15	0.45	1.05	1.20	1.15	1.40

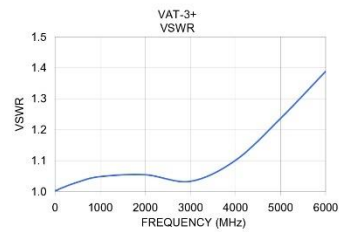
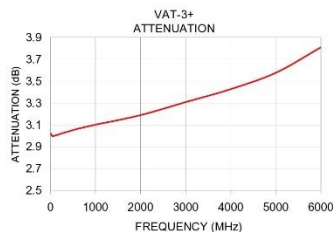
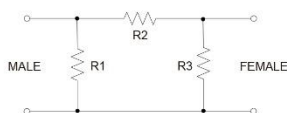
\* Attenuation varies by 0.3 dB max. over temperature.

\*\* Flatness= variation over band divided by 2.

## Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Attenuation (dB)	VSWR (:1)
0.03	3.02	1.00
50.00	3.00	1.00
100.00	3.00	1.01
500.00	3.05	1.03
1000.00	3.10	1.05
2000.00	3.19	1.05
3000.00	3.31	1.03
4000.00	3.43	1.10
5000.00	3.58	1.24
6000.00	3.81	1.39

## Electrical Schematic



## Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. H  
M151107  
VAT-3+  
LC/TD/CP/AM  
151012  
Page 1 of 1

Coaxial

# Low Noise Amplifier

ZX60-272LN+

50Ω 2300 to 2700 MHz

## Features

- Ultra low noise figure, 0.8 dB typ.
- Output power, up to +18.5 dBm typ.
- Good output IP3, 31.5 dBm typ.
- Good return loss
- Unconditionally stable
- Protected by US patent 6,790,049

## Applications

- WiMAX 2.5GHz
- Base transceiver station, tower mounted amplifier, repeater
- General purpose low noise amplifier
- Lab
- Instrumentation
- Test equipment



Case Style:GA955  
Connectors Model  
SMA ZX60-272LN-S+

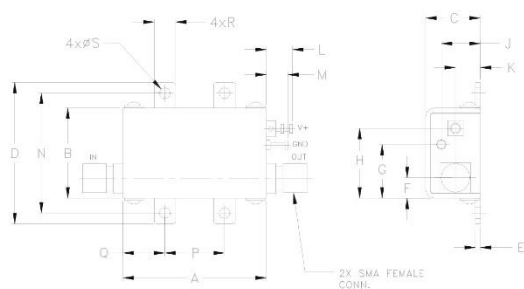
+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

## Electrical Specifications at 25°C

Parameter	Condition (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		2300		2700	MHz
Noise Figure	2300-2700		0.8	1.1	dB
Gain	2300-2700	11.5	14.0		dB
Gain Flatness	2300-2700		± 0.55	± 1.1	dB
Output Power at 1dB compression	2300-2700	16.0	18.5		dBm
Output third order intercept point (OIP3)	2300-2700		31.5		dBm
Input VSWR	2300-2700		1.2		:1
Output VSWR	2300-2700		1.6		:1
Active Directivity	2300-2700		7		dB
DC Supply Voltage			5.0		V
Supply Current			55	70	mA

## Outline Drawing



NOTE: When soldering the DC connections, caution must be used to avoid overheating the DC terminals. See Application Note AN-40-10.

## Outline Dimensions (inch)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	wt.
1.20	.75	.46	1.18	.04	.17	.45	.59	.33	.21	.22	.18	1.00	.50	.35	.18	.106	grams
30.48	19.05	11.68	29.97	1.02	4.32	11.43	14.99	8.38	5.33	5.59	4.57	25.40	12.70	8.89	4.57	2.69	35.0

### Notes

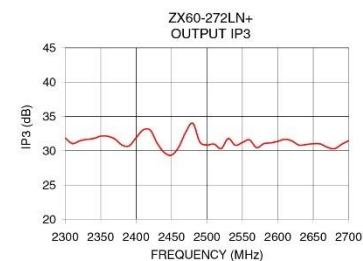
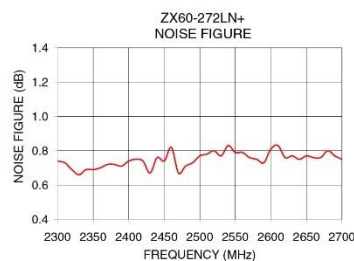
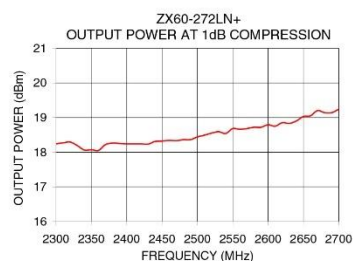
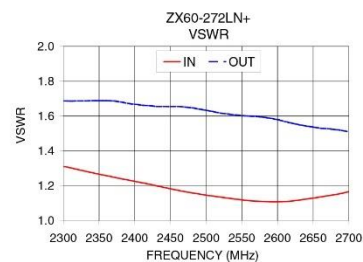
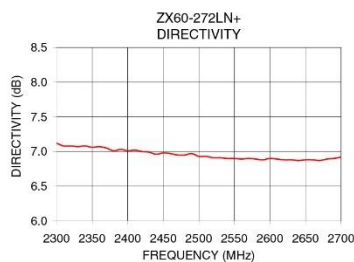
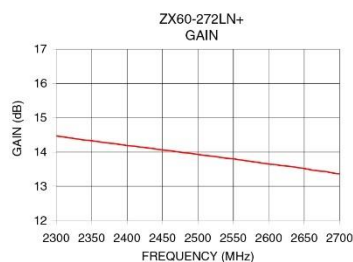
- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp)



[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. B  
M152326  
EDR-9795/5  
ZX60-272LN+  
RAV  
150813  
Page 1 of 2

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)	DIRECTIVITY (dB)	VSWR IN (:1)	VSWR OUT (:1)	POWER OUT @ 1dB COMPRESSION (dBm)	OUTPUT IP3 (dBm)	NF (dB)
2300.00	14.47	7.12	1.31	1.69	18.24	31.83	0.74
2320.00	14.41	7.08	1.29	1.69	18.29	31.42	0.69
2340.00	14.35	7.08	1.27	1.69	18.06	31.78	0.69
2360.00	14.30	7.07	1.26	1.69	18.05	32.10	0.70
2380.00	14.25	7.01	1.24	1.68	18.26	30.83	0.72
2400.00	14.19	7.01	1.23	1.67	18.24	31.89	0.74
2420.00	14.14	7.00	1.21	1.66	18.24	32.98	0.74
2440.00	14.09	6.96	1.19	1.66	18.31	29.71	0.76
2460.00	14.04	6.97	1.17	1.66	18.34	30.51	0.82
2480.00	13.98	6.95	1.16	1.65	18.36	34.00	0.71
2500.00	13.93	6.93	1.15	1.63	18.44	30.84	0.77
2520.00	13.88	6.91	1.13	1.62	18.55	30.31	0.80
2540.00	13.82	6.90	1.12	1.61	18.54	30.79	0.83
2560.00	13.77	6.89	1.11	1.60	18.66	31.57	0.79
2580.00	13.71	6.89	1.11	1.59	18.72	31.01	0.75
2600.00	13.65	6.90	1.11	1.58	18.79	31.36	0.81
2620.00	13.60	6.88	1.11	1.56	18.85	31.41	0.76
2640.00	13.55	6.87	1.12	1.54	18.90	30.90	0.75
2680.00	13.43	6.89	1.15	1.52	19.14	30.29	0.80
2700.00	13.36	6.92	1.17	1.51	19.24	31.47	0.75



Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



DC Pass

# Power Splitter/Combiner

2 Way-0° 50Ω 1900 to 4200 MHz

ZX10-2-42+



CASE STYLE: FL905

Connectors Model  
SMA ZX10-2-42-S+

+RoHS Compliant  
The + suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

## Maximum Ratings

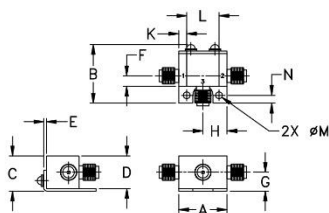
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Power Input (as a splitter)	1.0W max.
Internal Dissipation (as a combiner)	0.1W max.
DC Current	800 mA (400mA for each port)

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

## Coaxial Connections

SUM PORT	3
PORT 1	1
PORT 2	2

## Outline Drawing



## Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G
.74	90	54	.50	.04	.16	.29
18.80	22.86	13.72	12.70	1.02	4.06	7.37

H	J	K	L	M	N	wt
.37	—	.122	.496	.106	.122	grams
9.40	—	3.10	12.60	2.69	3.10	20.0

## Features

- low insertion loss, 0.2 dB typ.
- excellent amplitude unbalance
- very good phase unbalance
- small size
- low cost
- protected under U.S. Patent 6,790,049 & 6,963,255

## Applications

- communications
- defense
- PCS/DCS
- DECT

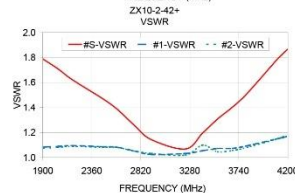
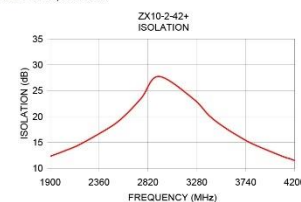
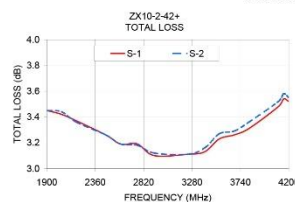
## Electrical Specifications (T<sub>AMB</sub>=25°C)

FREQ. RANGE (MHz)	ISOLATION (dB)	INSERTION LOSS (dB) ABOVE 3.0 dB	PHASE UNBALANCE (Degrees)	AMPLITUDE UNBALANCE (dB)
f <sub>1</sub> -f <sub>2</sub>	Typ. Min	Typ. Max.	Max.	Max.
1900-4200	23 10	0.2 1.2	5.0	0.3
2600-3400	23 17	0.2 0.6	4.0	0.3

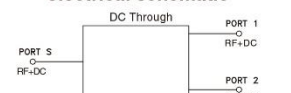
## Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Total Loss* (dB)		Amplitude Unbalance (dB)	Isolation (dB)	Phase Unbalance (deg.)	VSWR S	VSWR 1	VSWR 2
	S-1	S-2						
1900.00	3.45	3.45	0.00	12.33	0.70	1.79	1.08	1.07
2040.00	3.42	3.44	0.02	13.42	0.71	1.71	1.09	1.08
2180.00	3.37	3.36	0.01	14.64	0.74	1.62	1.10	1.09
2460.00	3.26	3.26	0.01	17.92	0.91	1.47	1.09	1.08
2600.00	3.19	3.19	0.00	20.16	1.05	1.39	1.08	1.08
2760.00	3.19	3.18	0.01	23.66	1.02	1.26	1.05	1.05
2920.00	3.10	3.12	0.02	27.75	1.18	1.14	1.02	1.03
3240.00	3.11	3.11	0.00	23.53	1.50	1.07	1.03	1.02
3400.00	3.13	3.16	0.03	20.10	1.54	1.19	1.05	1.10
3540.00	3.23	3.27	0.04	17.91	1.30	1.31	1.07	1.05
3680.00	3.26	3.29	0.03	16.12	1.55	1.40	1.07	1.06
3820.00	3.31	3.36	0.05	14.58	1.52	1.51	1.09	1.08
4100.00	3.48	3.52	0.03	12.21	1.48	1.78	1.15	1.15
4150.00	3.54	3.58	0.04	11.90	1.37	1.83	1.16	1.16
4200.00	3.52	3.55	0.03	11.51	1.50	1.87	1.17	1.18

1. Total Loss = Insertion Loss + 3dB splitter loss.



## electrical schematic



## Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at [www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp)

[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV L  
M151107  
ZX10-2-42+  
ED-10281/2  
HY/RS/CP/AM  
151019

Coaxial

# Frequency Mixer WIDE BAND

Level 13 (LO Power +13 dBm) 824 to 4200 MHz

ZX05-43MH+



## Maximum Ratings

Operating Temperature -40°C to 85°C

Storage Temperature -55°C to 100°C

RF Power 50mW

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

## Coaxial Connections

LO	2
RF	3
IF	1

## Features

- wide bandwidth, 824 to 4200 MHz
- low conversion loss, 6.1 dB typ.
- excellent L-R isolation, 35 dB typ.
- rugged construction
- small size
- useable as up and down converter
- protected by US patents, 6,790,049 and 7,027,795

## Applications

- cellular
- defense and weather radar
- defense communications
- PCN
- WCDMA
- WIFI
- blue tooth
- VSAT
- ISM

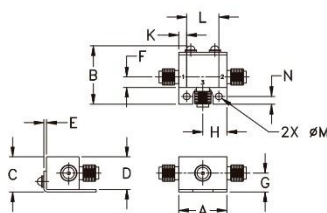
CASE STYLE: FL905

Connectors Model  
SMA ZX05-43MH-S+

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

## Outline Drawing



## Outline Dimensions (inch mm)

A	B	C	D	E	F	G
.74	.90	.54	.50	.04	.16	.29
18.80	22.86	13.72	12.70	1.02	4.06	7.37
H	J	K	L	M	N	wt
.37	---	.122	.496	.106	.122	grams
9.40	---	3.10	12.60	2.69	3.10	20.0

## Electrical Specifications

FREQUENCY (MHz)	CONVERSION LOSS* (dB)	LO-RF ISOLATION (dB)	LO-IF ISOLATION (dB)	IP3 at center band (dBm)
LO/RF L <sub>1</sub> /L <sub>2</sub>	IF	Typ. Min.	Typ. Min.	Typ.
824-4200	DC-1500			
824-2500		6.3 0.1 8.6	37 28	24 7 20
2500-4200		5.7 0.1 9.8	30 22	20 11 22

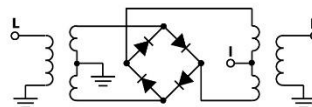
1 dB COMPRESS: +9 dBm typ.

\* Conversion loss at 30 MHz IF, σ is a measure of repeatability from unit to unit.

## Typical Performance Data

Frequency (MHz)		Conversion Loss (dB)	Isolation L-R (dB)	Isolation L-I (dB)	VSWR RF Port (:1)	VSWR LO Port (:1)
RF	LO	+13dBm	+13dBm	+13dBm	+13dBm	+13dBm
810.00	840.00	7.06	38.11	22.81	2.08	8.55
1010.00	1040.00	6.43	43.16	26.73	2.83	2.44
1210.00	1240.00	5.83	41.09	30.74	3.45	1.27
1410.00	1440.00	5.82	34.44	34.76	3.53	1.16
1610.00	1640.00	5.70	33.13	29.18	3.12	1.61
1810.00	1840.00	6.00	35.10	19.67	3.21	1.77
2010.00	2040.00	5.93	33.76	11.58	3.28	1.62
2210.00	2240.00	5.94	34.33	11.64	3.33	1.85
2410.00	2440.00	5.12	31.89	14.42	2.18	2.27
2610.00	2640.00	5.44	31.05	17.41	2.43	2.37
2810.00	2840.00	5.15	29.56	19.09	1.88	1.72
3010.00	3040.00	4.63	27.17	21.48	1.70	1.64
3210.00	3240.00	4.96	25.97	25.21	1.92	1.37
3410.00	3440.00	5.46	25.97	24.10	2.11	1.34
3610.00	3640.00	6.47	24.80	20.53	3.34	1.88
3810.00	3840.00	6.88	25.65	18.07	3.76	2.58
4010.00	4040.00	7.75	26.66	17.01	5.03	3.83
4110.00	4140.00	7.74	26.80	15.46	5.14	4.62
4150.00	4180.00	7.92	26.85	15.58	5.44	4.84
4210.00	4240.00	7.83	26.88	15.04	5.07	5.28

## Electrical Schematic



## Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp)

REV. A  
M151109  
ZX05-43MH+  
ED-1200214  
DJ/TD/QL/AM  
1511009



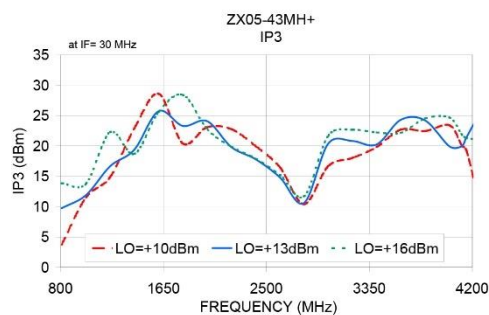
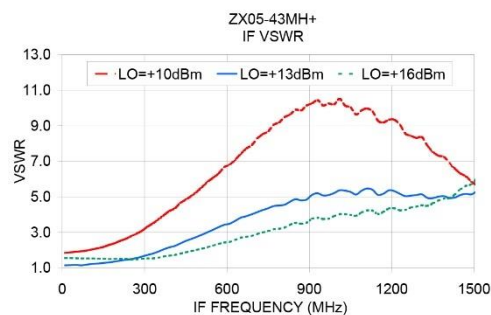
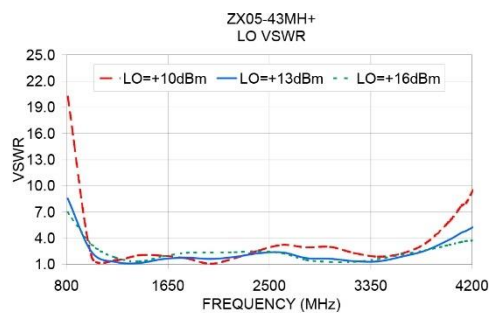
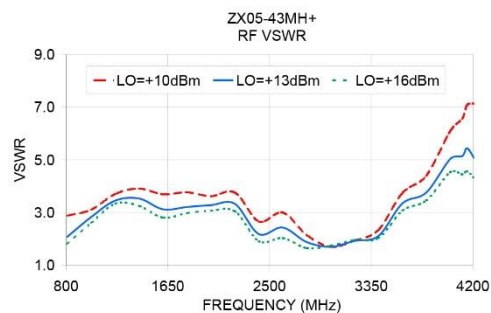
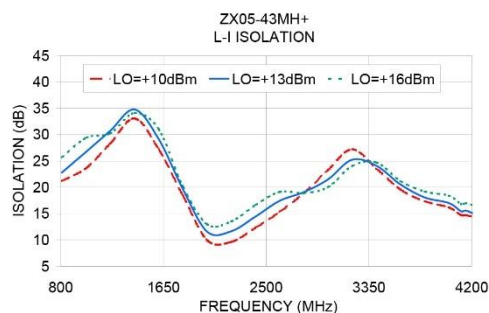
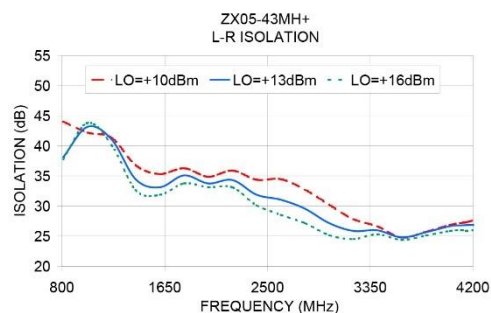
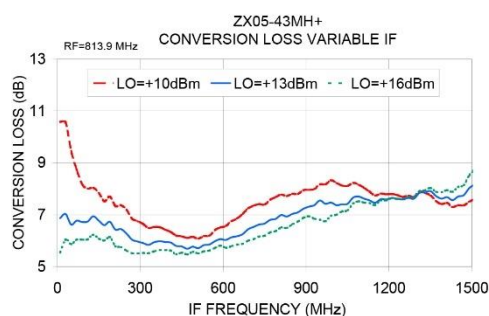
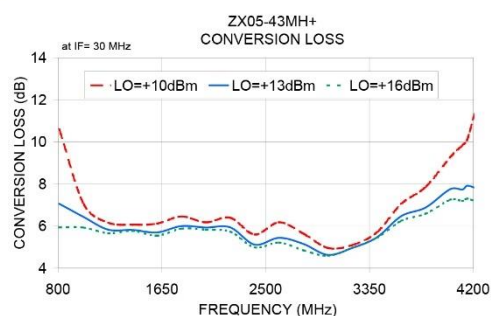
[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Page 1 of 2



## Performance Charts

## ZX05-43MH+



### Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



[www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Page 2 of 2

## Anexo B: Esquemáticos

En el presente anexo, se va a mostrar tanto el diseño de la placa PCB (figura 25) como el esquemático (figura 28).





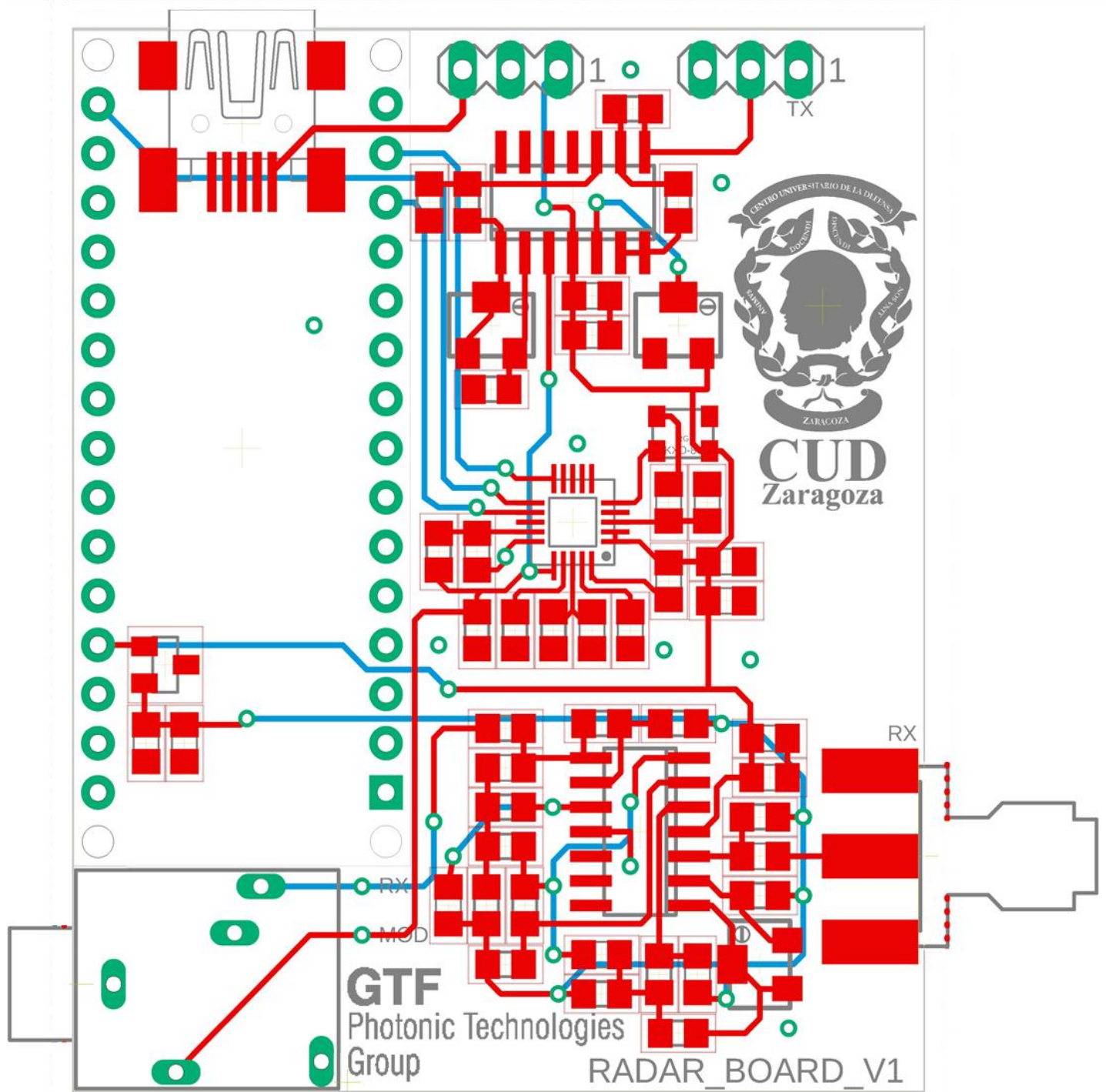


Figura 25. Huella PCB

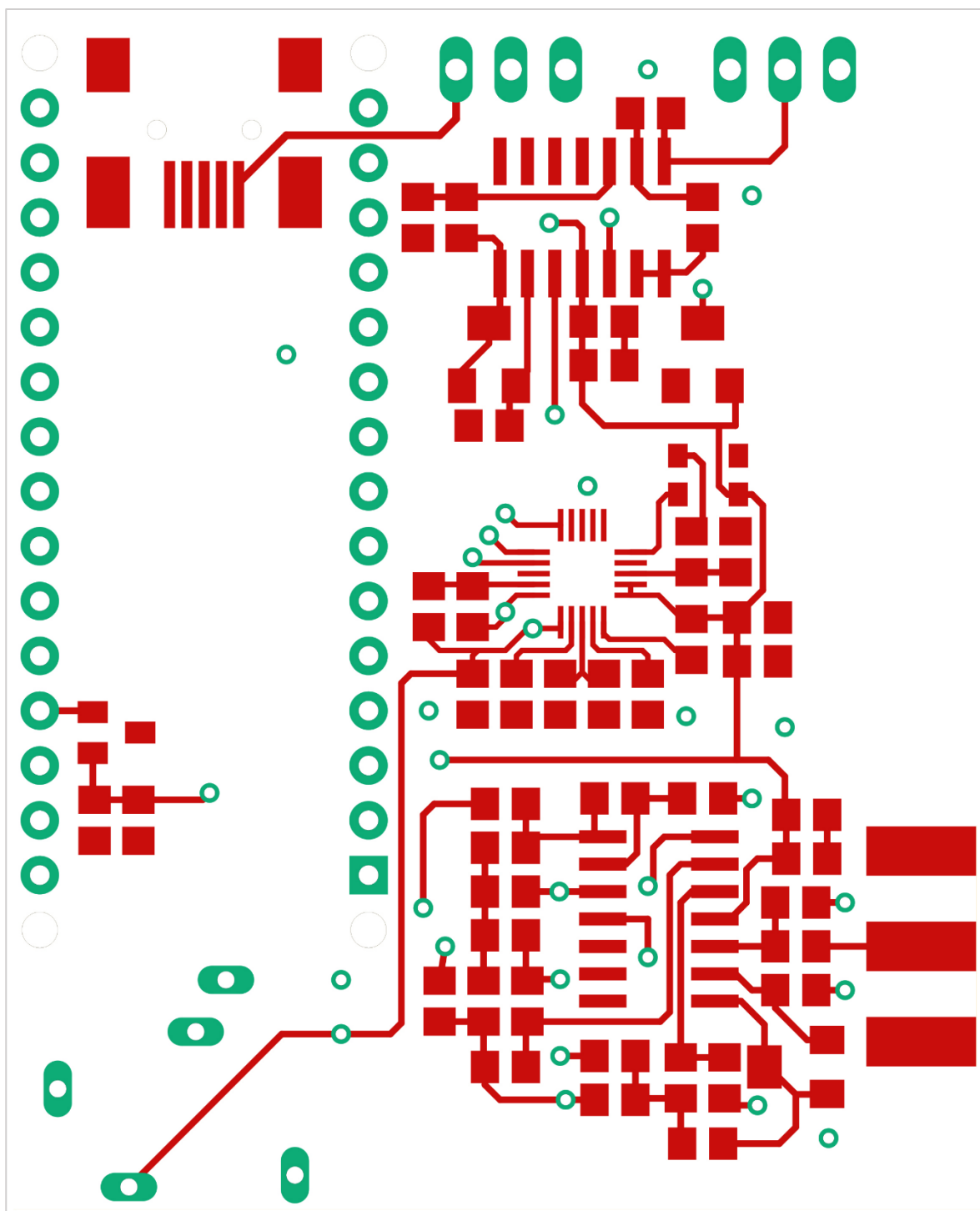


Figura 26. Capa superior PCB

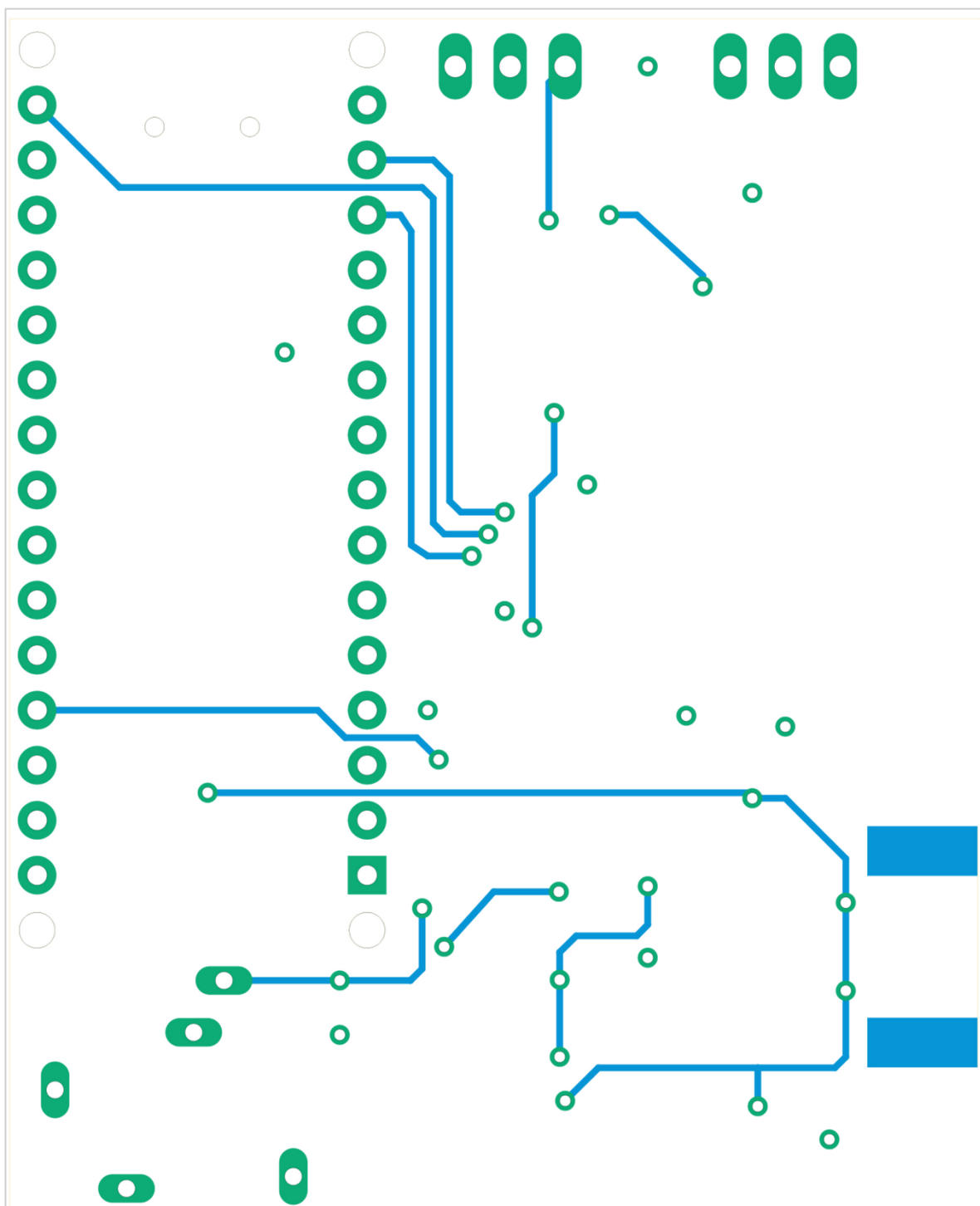


Figura 27. Capa inferior PCB

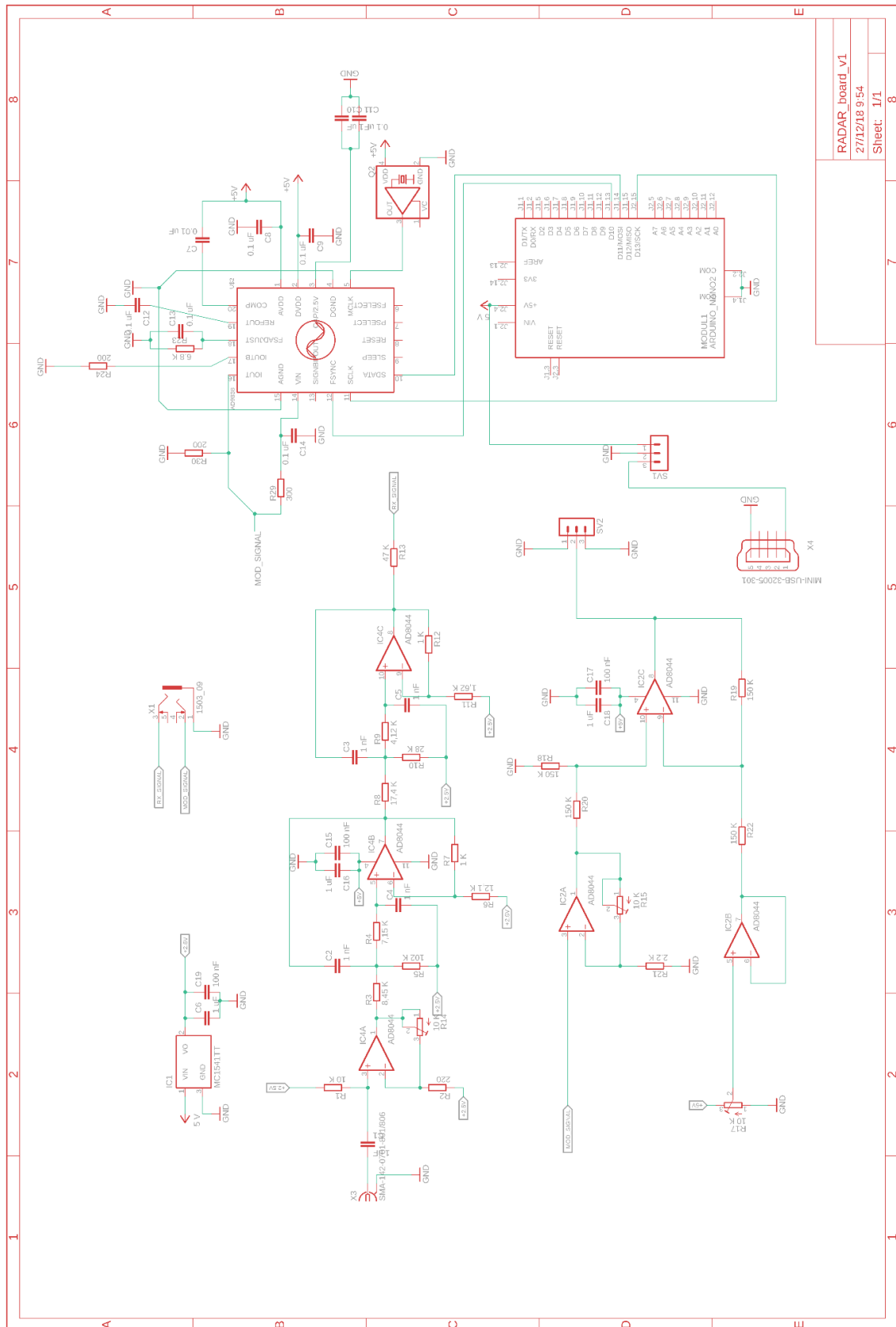


Figura 28. Esquemático

## Anexo C: Dimensión antenas

Como se ha comentado en el desarrollo de la memoria de este trabajo, el diámetro de las antenas se ha escogido de tal forma que se propague el modo fundamental pero que se atenúen los demás. En este caso el modo fundamental es el modo TE<sub>11</sub> y la frecuencia de trabajo escogida ha sido de 2,4 GHz. Para los datos seleccionados podemos obtener las dimensiones necesarias para la propagación de la guía de onda como se explica en el presente anexo.

Teniendo en consideración el esquema del dimensionado de la antena comentado en el apartado correspondiente al capítulo 3, en esta sección se comentarán las fórmulas escogidas y se calculará el valor del diámetro y los parámetros correspondientes a las dimensiones de las antenas. Para llevar a cabo los cálculos, se ha hecho uso del libro [7].

Como el modo que se va a propagar en la guía es el TE<sub>11</sub>, se ha de ir a la tabla de los ceros de la derivada de la función de Bessel y coger aquel valor cuya  $n = 1$  y  $m = 1$ , en este caso  $\chi'_{mn} = 1,8412$  brevemente se representan los primeros valores de esta función en la tabla 5.

	m = 0	m = 1	m = 2
n = 1	3.8318	1.8412	3.0542
n = 2	7.0156	5.3315	6.7062

Tabla 6. Ceros  $X_{nm}$  de la función de Bessel  $J_m(x)$  para el modo TE

A continuación, en la tabla 7 se muestran los ceros de la derivada de la función de Bessel para el modo TM, en este caso, se ha de escoger aquel cuyo  $m = 0$  y  $n = 1$ , en este caso  $\chi'_{mn} = 2,4049$ , que se corresponde con el modo TM<sub>01</sub>.

	m = 0	m = 1	m = 2
n = 1	2.4049	3.8318	5.1357
n = 2	5.5201	7.0156	8.4173

Tabla 7. Ceros  $X_{nm}$  de la función de Bessel  $J_m(x)$  para el modo TM

La constante de propagación para este modo se calculará como  $\beta_{11}^2 = k^2 - k_{11}^2$ :

$$(\beta_z)_{11} = \begin{cases} \sqrt{\beta^2 - \beta_\rho^2} = \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{\chi'_{11}}{a}\right)^2} & \text{si } \beta > \beta_\rho = \frac{\chi'_{11}}{a} \\ 0 & \text{si } \beta = \beta_c = \beta_\rho = \frac{\chi'_{11}}{a} \\ -j \sqrt{\beta_\rho^2 - \beta^2} = -j \sqrt{\left(\frac{\chi'_{11}}{a}\right)^2 - \beta^2} & \text{si } \beta < \beta_\rho = \frac{\chi'_{11}}{a} \end{cases}$$

De la ecuación anterior, se obtiene  $\beta_c$  como:

$$\beta_c = \omega_c \sqrt{\mu \epsilon} = 2\pi f_c \sqrt{\mu \epsilon} = \beta_\rho = \frac{\chi'_{11}}{a}$$

Siendo  $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  la constante dieléctrica,  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  la constante de propagación y  $a$  el radio de la antena.

Si se despeja  $f_c$  de la ecuación, se obtiene el valor de la frecuencia de corte para el modo TE<sub>11</sub> como sigue:

$$(f_c)_{11} = \frac{\chi'_{11}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}}$$

Considerando que el diámetro de la antena óptimo oscila entre 75 y 95 mm, se ha optado por un diámetro de 84 mm. Por lo tanto, el valor de la frecuencia de corte es aproximadamente 2 GHz.

La longitud de la onda de la guía se define como:

$$(\lambda_g)_{11} = \frac{2\pi}{(\beta_z)_{11}}$$

Aunque podría escribirse también como:

$$(\lambda_g)_{11} = \begin{cases} \frac{2\pi}{\beta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} & \text{si } f > f_c = (f_c)_{11} \\ \infty & \text{si } f = (f_c)_{11} \end{cases}$$

Se considera que la longitud de onda  $\lambda$  viene dada por la expresión:

$$\lambda = c/f$$

Donde  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz y  $f = 2,4 \text{ GHz}$  es la frecuencia de operación de las antenas. Sustituyendo los valores, se obtiene que la longitud de onda de la guía será de 26 cm aproximadamente.

Para finalizar, la longitud de onda de corte  $\lambda_c$  se corresponde con la siguiente ecuación:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{\chi'_{11}} = 1,706 \cdot D$$

Donde  $D = 2a$  hace referencia al diámetro de la antena seleccionada.

Para concluir, la figura 29 representa las dimensiones y valores aproximados que se han escogido tanto para la elección de las antenas como para la frecuencia de trabajo deseada.

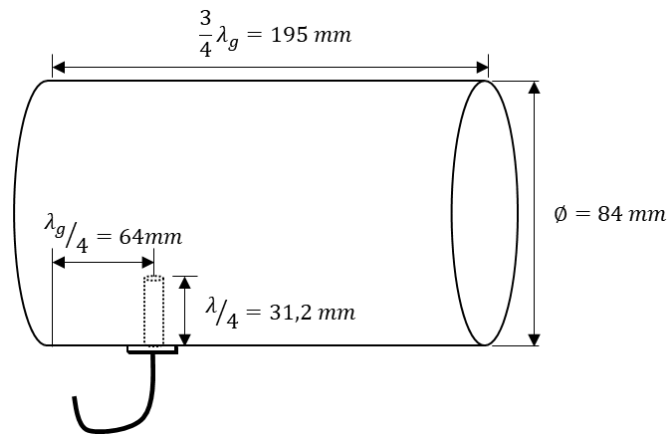


Figura 29. Diseño de antena con medidas aproximadas

## Anexo D: Programa de Arduino

En el presente anexo se incluye el código de Arduino necesario para la elección de la frecuencia de trabajo deseada por el usuario y el modo de operación empleado. Para utilizar este BUS en Arduino, lo primero que se ha de tener en cuenta son las variables que se necesitan para realizar la operación como se puede observar en la tabla 8.

```
#define speedMaximum 25000
#define setMode MSBFIRST
#define dataMode SPI_MODE2
```

Tabla 8. Parámetros para configurar el bus spi

La primera variable hace referencia a la velocidad máxima de comunicación que se va a aplicar, la segunda se corresponde con el modo en el que se van a procesar los bits, si se van a tener en cuenta primero los bits más significativos (MSBFIRST) o si se van a tener en cuenta primero los bits menos significativos (LSBFIRST), para finalizar la última variable hace referencia al modo de SPI que se va a utilizar. [8] [9] [10]

Para el desarrollo de este trabajo, se ha tenido en cuenta del valor de SPI\_MODE 2 mostrado en la tabla 9, ya que éste coge el flanco de bajada como inicio que se corresponde como se puede ver en la figura 30 con la transmisión de datos en MOSI (*Master Out Slave In*).

MODO	Polaridad Reloj (CPOL)	Fase Reloj (CPHA)	Salida	Dato
SPI_MODE0	0	0	Bajada	Subida
SPI_MODE1	0	1	Subida	Bajada
SPI_MODE2	1	0	Subida	Bajada
SPI_MODE3	1	1	Bajada	Subida

Tabla 9. Valores del SPI\_MODE

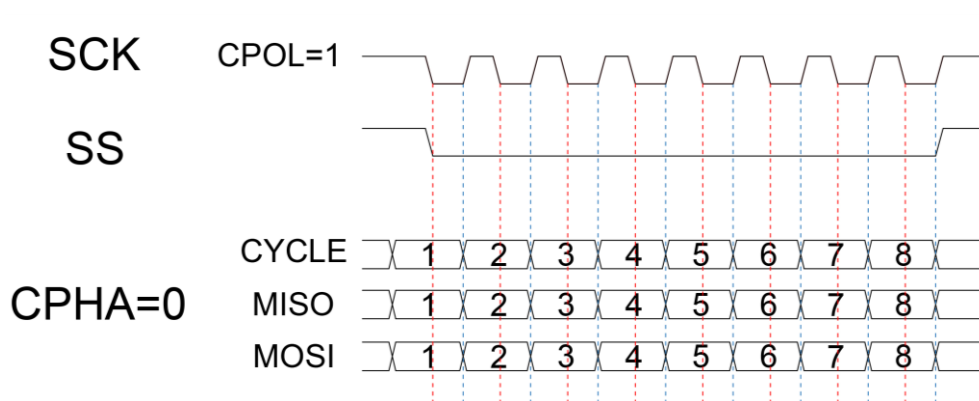


Figura 30. Interfaz BUS SPI

A continuación, en la figura 31, se presenta el código necesario para la generación de la frecuencia que el usuario desee que se aplique al sistema.

```

#include <SPI.h>
#define DEBUG(a) Serial.print (a);
#define speedMaximum 25000 //Velocidad máxima de comunicación
#define setMode MSBFIRST //Procesado de los bits
#define dataMode SPI_MODE2 //Modo spi empleado
const int RESET = 0x0100;
const long MODE = 0x2002;
const int FSYNC = 10;
SPISettings settingsA (speedMaximum, setMode, dataMode);
void setup () {
    Serial.begin (9600);
    SPI.begin ();
    SPI.beginTransaction (settingsA);

    pinMode (FSYNC, OUTPUT);
    digitalWrite (FSYNC, LOW);
    Serial.print ("RESET_BIN: ");
    long R1 = (RESET >> 8) & 0xff; //Desplazamiento de 8 bits a la derecha + máscara
    long R2 = (RESET) & 0xff;
    SPI.transfer (R1);
    SPI.transfer (R2);
    digitalWrite (FSYNC, HIGH);
    Serial.setTimeout (50);
}
void loop () {
    if (Serial.available () > 0) {
        // RESET
        Serial.println (RESET, BIN);
        long R1 = (RESET >> 8) & 0xff; //Desplazamiento hacia la derecha 8 bits con máscara
        Serial.println (R1, HEX);
        long R2 = (RESET) & 0xff;
        Serial.println (R2, HEX);

        // FREQ
        Serial.print ("FREQ (Hz): ");
        String fq = Serial.readStringUntil ('\n');
        long fdec = fq.toInt();
        Serial.println (fdec);
        long f1 = (fdec / 16000000.0) * pow(2, 28); //Aplicación fórmula de la freq de registro
        Serial.print ("F_BIN: ");
        Serial.println (f1, BIN);
        Serial.print ("F_HEX: ");
        Serial.println (f1, HEX);

        // CMD
        Serial.print ("MODE_BIN: ");
        Serial.println (MODE, BIN);
        long MODE1 = (MODE >> 8) & 0xff;
        Serial.println (MODE1, HEX);
        long MODE2 = (MODE) & 0xff;
        Serial.println (MODE2, HEX);

        // WORD
        Serial.print ("LSB_BIN: ");
        long LSB = (f1 & 0x3fff);
        Serial.println (LSB, BIN);
        long LSB1 = (LSB | 0x4000);
        Serial.print ("CMD_BIN: ");

```



```

Serial.println (LSB1, BIN);
long L1 = (((LSB | 0x4000) >> 8) & 0xff); //0100.1111.0101.1100 despl. + máscara
                                     @      LSB
Serial.println (L1, HEX);
long L2 = (LSB | 0x4000) & 0xff;
Serial.println (L2, HEX);

Serial.print ("MSB_BIN: ");
long MSB = ((f1 >> 14) & 0x3fff);
Serial.println (MSB, BIN);
long M = (MSB | 0x4000);
Serial.print ("CMD_BIN: ");
Serial.println (M, BIN);
long M1 = (((MSB | 0x4000) >> 8) & 0xff);
Serial.println (M1, HEX);
long M2 = (MSB | 0x4000) & 0xff;
Serial.println (M2, HEX);

digitalWrite (FSYNC, LOW);
SPI.transfer (R1);
SPI.transfer (R2);
digitalWrite (FSYNC, HIGH);
digitalWrite (FSYNC, LOW);
SPI.transfer (MODE1);
SPI.transfer (MODE2);
digitalWrite (FSYNC, HIGH);
digitalWrite (FSYNC, LOW);
SPI.transfer (L1);
SPI.transfer (L2);
SPI.transfer (M1);
SPI.transfer (M2);
digitalWrite (FSYNC, HIGH);

SPI.endTransaction ();
}
}

```

Figura 31. Código para la selección de la frecuencia



## Anexo E: Presupuesto

A continuación, se muestra el presupuesto aproximado para la elaboración de un radar en onda continua con modulación triangular, con todos los componentes necesarios. Hay que destacar que se trata de un presupuesto sólo de materiales ya que la mano de obra en el montaje, desarrollo y evaluación no se han tenido en cuenta de forma económica.

El presupuesto para la realización del radar asciende a 507,22 €. Esta cantidad se ha dividido en bloques que corresponden con la parte de RF (365,37 €) que se puede observar en la tabla 10, las latas que hacen el papel de antenas (58,37 €) analizadas en la tabla 11 y toda la electrónica necesaria para las placas (71,50 €) mostrada en la tabla 12. Aunque el total resulte un valor alto, se repite que la mano de obra no ha sido incluida. Además, la parte que más encarece este presupuesto es la etapa de RF y en líneas futuras ya se ha comentado una posible mejora, que los elementos de esta etapa sean integrables en la propia PCB. Por lo tanto, para líneas futuras si se deseara volver a realizar este proyecto con la mejora de los elementos de la etapa de RF integrados en la propia PCB, el coste total del radar se reduciría.

### Etapa RF

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PROVEEDOR	PRECIO/UD	TOTAL
VCO	ZX95-2536C+	1	Mini-Circuits	100,77 €	100,77 €
ATT	VAT-3+	1	Mini-Circuits	14,21 €	14,21 €
LNA	ZX60-272LN-S+	2	Mini-Circuits	71,24 €	142,48 €
SPLITTER	ZX10-2-42+	1	Mini-Circuits	35,93 €	35,93 €
MIXER	ZX05-43MH-S+	1	Mini-Circuits	47,74 €	47,74 €
CONNECTOR	SM-SM50+	4	Mini-Circuits	6,06 €	24,24 €
TOTAL (1)					365,37 €

Tabla 10. Presupuesto correspondiente a la etapa de RF

### Antenas

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PROVEEDOR	PRECIO/UD	TOTAL
	Latas metálicas	2	LaBolata	3,50 €	7,00 €
SMA F bulkhead	901-9889-RFX	2	Mouser	5,90 €	11,80 €
SMA M-M Cables	086-12SM+	2	Mini-Circuits	13,19 €	26,38 €
TOTAL (2)					45,18 €

Tabla 11. Presupuesto necesario para las antenas

## PCB

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	VALOR	CANTIDAD	PROVEEDOR	PRECIO/UD	TOTAL
Resistencias	KTR18EZPF1503	150 K $\Omega$	4	Farnell	0,08 €	0,31 €
	KTR18EZPF1002	10 K $\Omega$	3	Farnell	0,09 €	0,26 €
	ESR10EZPF1001	1 K $\Omega$	2	Farnell	0,08 €	0,17 €
	ESR10EZPJ2221	220 $\Omega$	1	Farnell	0,06 €	0,06 €
	KTR10EZPF8201	8,2 K $\Omega$	1	Farnell	0,07 €	0,07 €
	KTR03EZPF1003	100 K $\Omega$	1	Farnell	0,06 €	0,06 €
	WR06X6801FTL	6,8 K $\Omega$	2	Farnell	0,05 €	0,10 €
	ERJ3EKF1202V	12 K $\Omega$	1	Farnell	0,05 €	0,05 €
	RC0603FR-0718KL	18 K $\Omega$	1	Farnell	0,03 €	0,03 €
	RC1206FR-0727KL	27 K $\Omega$	1	Farnell	0,08 €	0,08 €
	WR06X4301FTL	4,3 K $\Omega$	1	Farnell	0,05 €	0,05 €
	ERJ2GEJ162X	1,6 K $\Omega$	1	Farnell	0,02 €	0,02 €
	ERJ3EKF4702V	47 K $\Omega$	1	Farnell	0,05 €	0,05 €
Mini USB tipo B	65100516121		1	Farnell	1,09 €	1,09 €
Oscilador Cristal	Q33310F70020211		1	Farnell	2,39 €	2,39 €
Condensadores	C0805C105K3RACTU	1 $\mu$ F	7	Farnell	0,17 €	1,17 €
	C0805C104M5VACTU	0,1 $\mu$ F	6	Farnell	0,11 €	0,65 €
	C0805C102J1GACTU	1 nF	4	Farnell	0,31 €	1,25 €
	C0805C103J3GACTU	0,01 $\mu$ F	1	Farnell	0,38 €	0,38 €
Potenciómetro	44WR10KLFT7	10 K $\Omega$	3	Farnell	2,77 €	8,31 €
Amplificadores Operacionales	AD9838BCPZ-RL7		1	Farnell	5,52 €	5,52 €
	AD8044		2	Farnell	7,90 €	15,80 €
Arduino	Arduino nano ATmega328P		1	Farnell	16,29 €	16,29 €
Conector Jack	1503 09 Lumberg		1	Farnell	1,83 €	1,83 €
Conector Placa-Placa	HTSW-132-07-T-S		1	Farnell	2,81 €	2,81 €
Placa PCB	Fabriación PCB		1	2Cisa	12,00 €	12,00 €
Referencia de Tensión	MCP1525T-I/TT		1	Farnell	0,67 €	0,67 €
TOTAL (3)						71,5 €

Tabla 12. Presupuesto requerido para el montaje de la placa de circuito impreso